This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

ENG 3758 96.3

HARVARD COLLEGE
LIBRARY

FROM THE LIBRARY OF
FRANCIS PEABODY MAGOUN
Class of 1890

THE GIFT OF HIS SON
FRANCIS PEABODY MAGOUN, JR.
Class of 1916

GODFREY LOWELL CABOT SCIENCE LIBRARY

457
3
14610

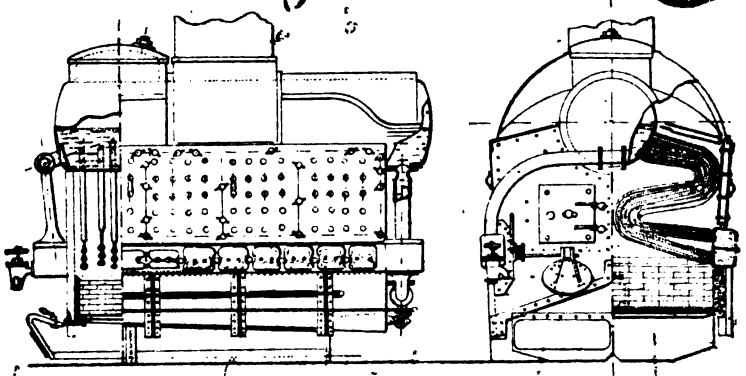
L.-E. BERTIN

DIRECTEUR DES CONSTRUCTIONS NAVALES

CHAUDIÈRES MARINES

COURS DE MACHINES A VAPEUR

PROFESSE A L'ÉCOLE D'APPLICATION DU GENIE MARITIME



PARIS

E. BERNARD et Cie, IMPRIMEURS-EDITEURS

53 ter, *Quai des Grands-Augustins*, 53 ter

1896

SOCIÉTÉ DES GÉNÉRATEURS INEXPLOSIBLES « BREVETS NICLAUSSE »

J. & A. NICLAUSSE

Fournisseurs des Marines militaires Française, Russe, Anglaise, Allemande, Espagnole, Argentine, Chilienne, etc.

MARINES MILITAIRES. — Croiseur **Friant** (9.000 chevaux); — **Ersatz Freya** (10.000 chevaux); — **Cristobal Colon** (14.000 chevaux); — **Hkrabry** (3.000 chevaux); — **Seagull** (3.000 chevaux), etc., etc.

MARINE DE COMMERCE. — Remorqueurs du Rhône (Schneider et C^e^) (4.000 chevaux); — Compagnie Générale des Bateaux Parisiens (nouvelle flotte pour l'Exposition Universelle de 1900); — René André (Remorqueurs Saint-Nazaire), etc., etc.

NAVIGATION DE PLAISANCE. — Yacht **Almée** (M. Henri Ménier); Yacht **Saint-Hubert** (M. Courtois de Langlade), etc., etc.

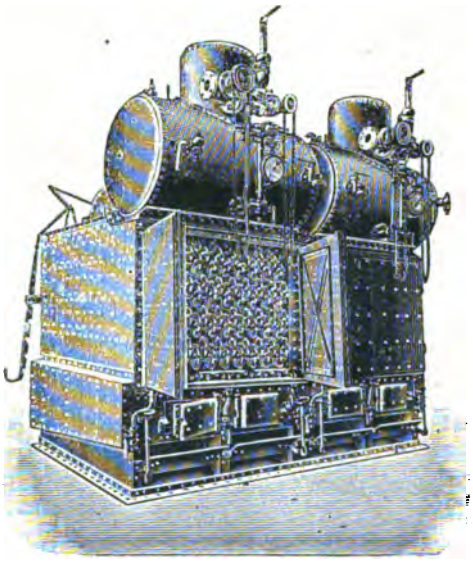
PRINCIPALES APPLICATIONS. — Construction de générateurs pour : Cuirassés, Croiseurs, Avisos, Torpilleurs, Embarcations, Navires de plaisance, Remorqueurs, Services auxiliaires, Chalands électriques, etc., etc.

Joints absolument métalliques.

Toutes les pièces interchangeables.

Le montage fractionné en parties d'un maniement facile.

Les plus hautes combustions sont obtenues sans autres accessoires que ceux des chaudières ordinaires et sans déformation du faisceau tubulaire.



Moins de une minute pour changer un tube.

Tubes droits facilement nettoyables.

Simplicité et robusticité des organes.

Tous les services, même le changement d'un tube isolément, exclusivement par la façade.

Minimum de poids d'emplacement et de volume.

Résistance aux exigences de navires de guerre : Changement brusque d'allure et passage très rapide d'une combustion ordinaire aux combustions forcées.

PARIS. — 24, rue des Ardennes, 24. — PARIS.

Société Anonyme DU TEMPLE

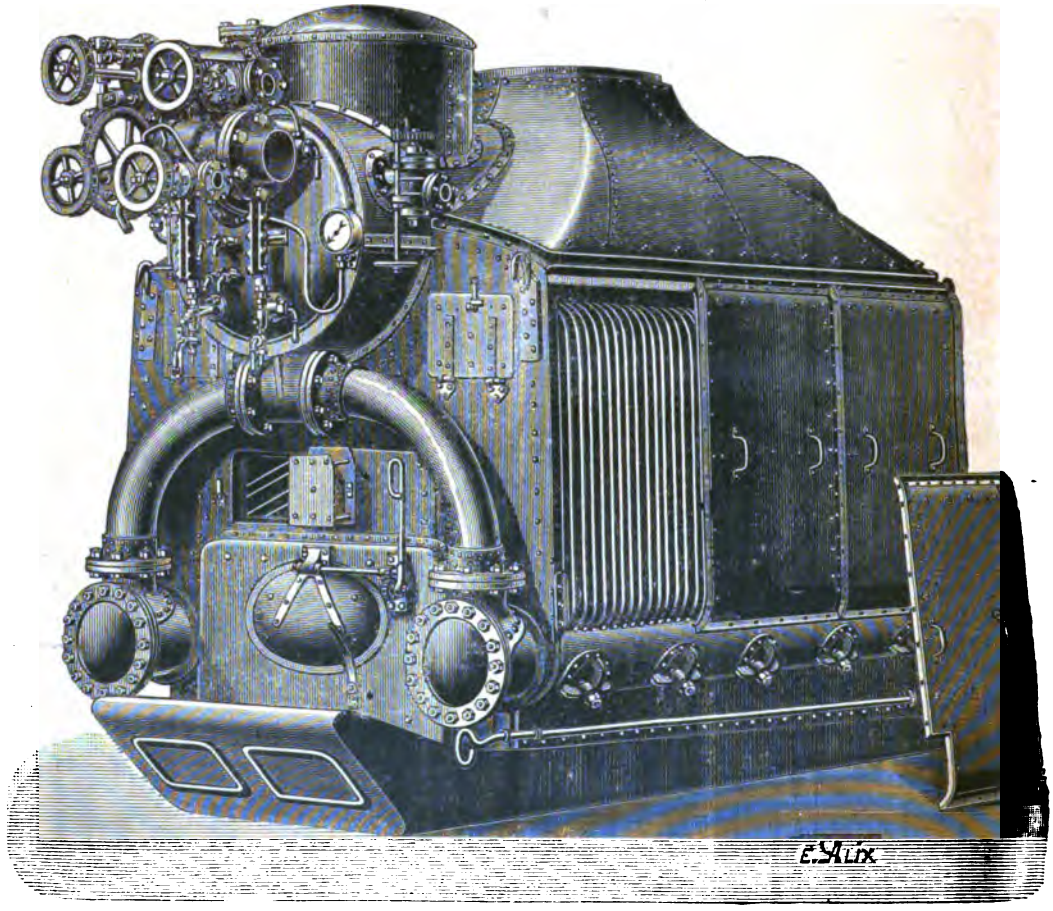
FONDÉE EN 1882

Bureaux et Ateliers de Construction à **CHERBOURG** *(Manche)*

CHAUDIÈRES AQUATUBULAIRES

à flamme directe et à retour de flammes

(BREVETS DE 1893 ET DE 1895)



Fournisseur des marines de guerre Française, Anglaise, Autrichienne, Japonaise, Norvégienne, Russe, etc.

Spécialité de chaudières légères à grande puissance

pour navires rapides, torpilleurs, yachts de course, paquebots à grande vitesse, croisseurs, etc.

Envoi *franco* de la NOTICE et des RÉFÉRENCES sur demande adressée à **M. l'Administrateur** délégué de la Société à **Cherbourg.**

MÉDAILLE D'ARGENT, EXPOSITION UNIVERSELLE 1889. — MÉDAILLE D'OR EXPOSITION DE ROUEN 1896

SPÉCIALITÉ D'APPAREILS DE GRAISSAGE

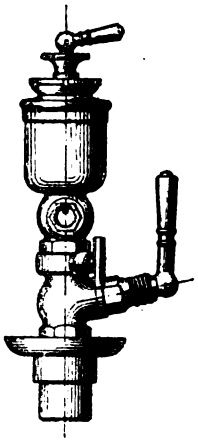
ROBINETS A SOUPAPE ÉQUILIBRÉE

R. HENRY

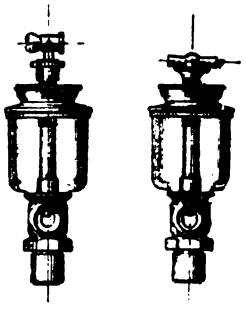
Seul Constructeur-Concessionnaire des marques et des brevets J. HOCHGESAND

TELEPHONE — PARIS — 117, Boulevard de la Villette, 117. — PARIS — TELEPHONE

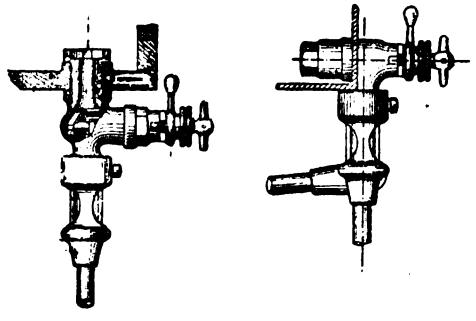
Graisseurs perfectionnés brevetés s.g.d.g. débit visible et réglage, remplissage facile pendant la marche pour tiroirs et cylindres de toutes machines.

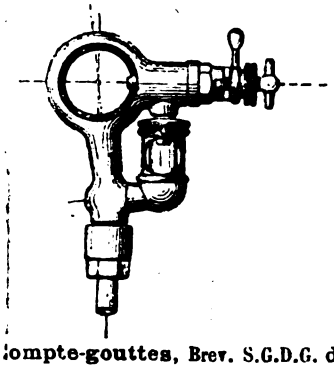


Graisseurs brevetés s.g.d.g. pour paliers et bielles à débit visible et réglage

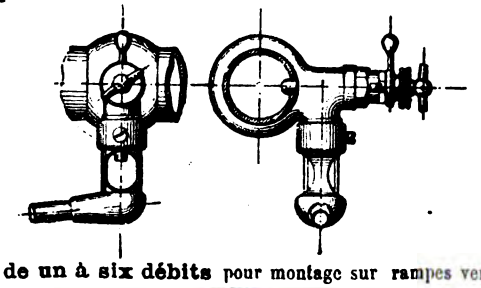


Compte-Gouttes brevetés s. g. d. g.
Arrêt et remise en marche sans changement du réglage, s'adaptant à des récipients de forme et dimensions quelconques

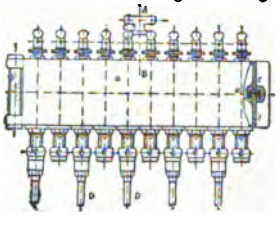




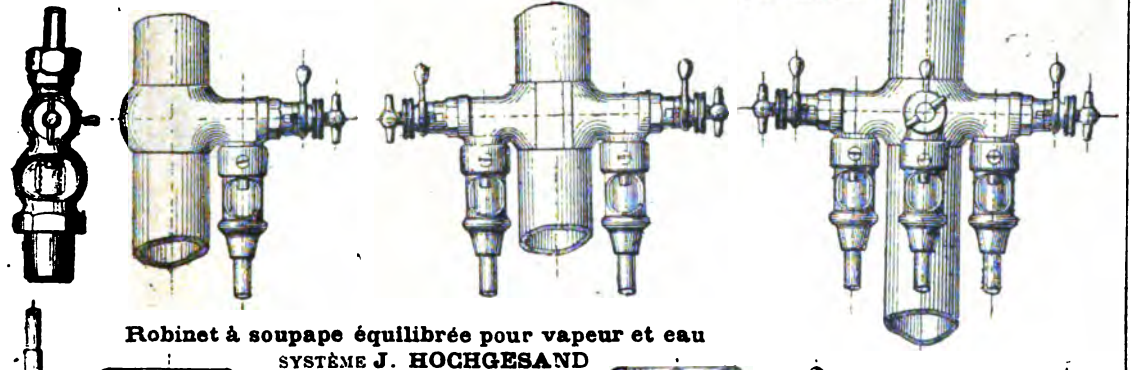
Compte-gouttes, Brevetés S. G. D. G. pour montage sur rampes horizontales



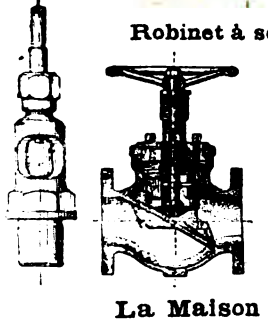
Oléopolymètre
Appareils de graissage à plusieurs débits
niveau constant, arrêt et mise en marche sans changer le réglage



Compte-gouttes, Brev. S.G.D.G. **de un à six débits** pour montage sur rampes verticales

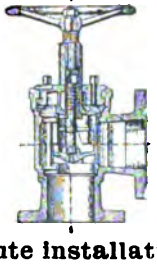


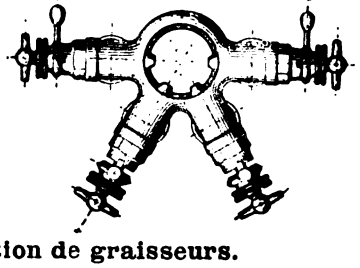
Robinet à soupape équilibrée pour vapeur et eau
SYSTÈME **J. HOCHGESAND**
Breveté S. G. D. G.



Ce robinet se fait avec corps, bouchon et volant en fonte et toutes les pièces intérieures en bronze de qualité supérieure.

Sa construction permet de visiter, réparer et même remplacer ses pièces intérieures, sans déplacer le corps du robinet.





Demander les Prospectus.

La Maison se charge de l'étude de toute installation de graisseurs.

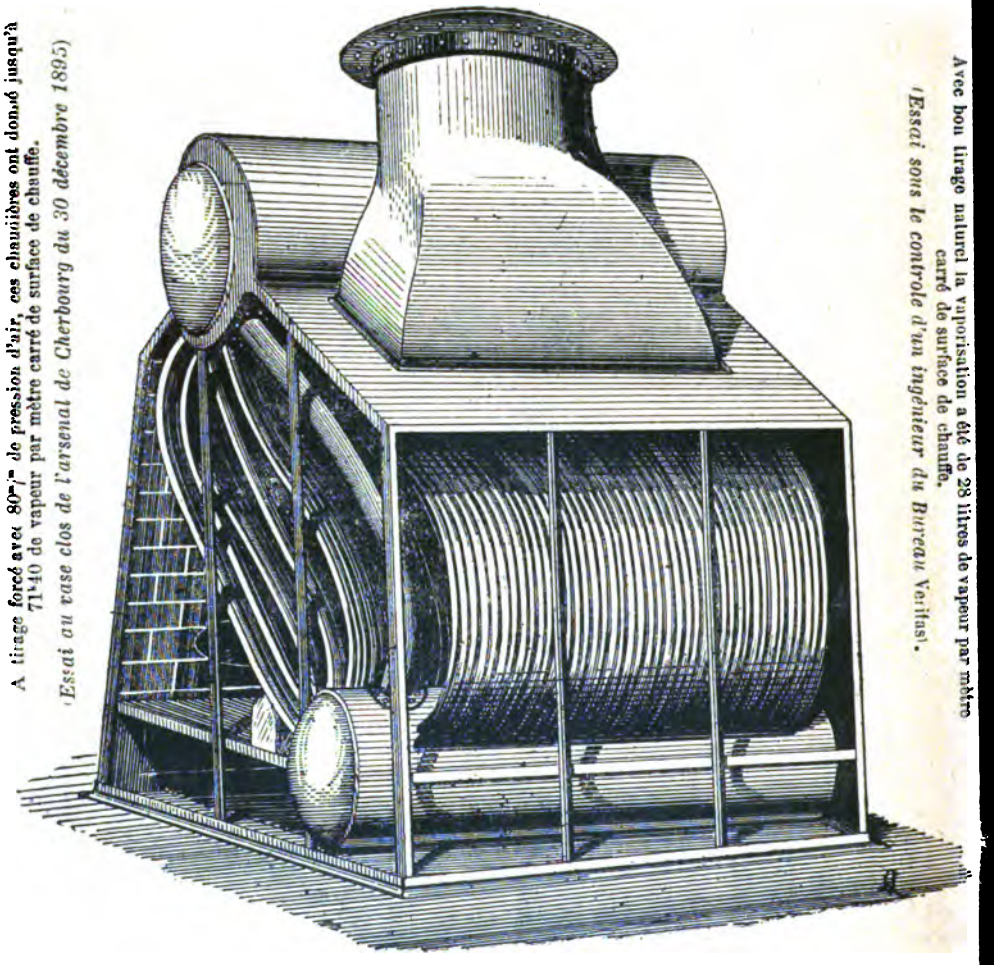
H. LEBLOND & CAVILLE Ingénieurs-Constructeurs

à CHERBOURG (*Manche*)

CHAUDIÈRES MULTITUBULAIRES, MARINES & INDUSTRIELLES

Brevetées S. G. D. G.

A tirage forcé avec 80^{m}/^{m} de pression d'air, ces chaudières ont donné jusqu'à 71^{k}40 de vapeur par mètre carré de surface de chauffe.
Essai au vase clos de l'arsenal de Cherbourg du 30 décembre 1895)



Avec bon tirage naturel la vaporisation a été de 28 litres de vapeur par mètre carré de surface de chauffe.
(Essai sous le contrôle d'un ingénieur du Bureau Veritas).

10 kilos d'eau vaporisée par kilo de charbon.

Timbre de 8 à 18 atmosphères.

Ces chaudières, par leur forme, se prêtent merveilleusement à leur installation en batterie à bord des grands navires. La réparation et les visites se faisant exclusivement par les façades A et R, il est facile de les placer côte à côte.

Chaudière du bateau rouleur **Ernest-Bazin**

180^{m3} de surface de chauffe. Vaporisant 11000 litres de vapeur à 12 kilos avec une pression d'air de 75 ^{m}/^{m} et 8130^{k} avec seulement 15 ^{m}/^{m} de pression d'air.
(Essais des 19 et 22 septembre 1896 dans le vase clos de l'arsenal de Cherbourg)

AUGUSTIN NORMAND & Cie

CONSTRUCTEURS AU HAVRE

Chaudière Normand

Brevetée S.G.D.G.

La somme des applications en France et à l'Etranger

dépasse actuellement 200.000 *chevaux*

FILTRE D'EAU D'ALIMENTATION

BREVETÉ S.G.D.G.

appliqué en France et à l'Étranger

à des machines d'une puissance collective de 700.000 chevaux

AUGUSTIN NORMAND & Cie, Constructeurs au HAVRE

SOCIÉTÉ ANONYME

DES

FORGES & CHANTIERS DE LA MÉDITERRANÉE

HAVRE

Chaudière Normand-Sigaudy

BREVETÉE S.G.D.G.

pour Paquebots, Grands Yachts,

Croiseurs et Cuirassés

RÉGULATEUR D'EAU D'ALIMENTATION

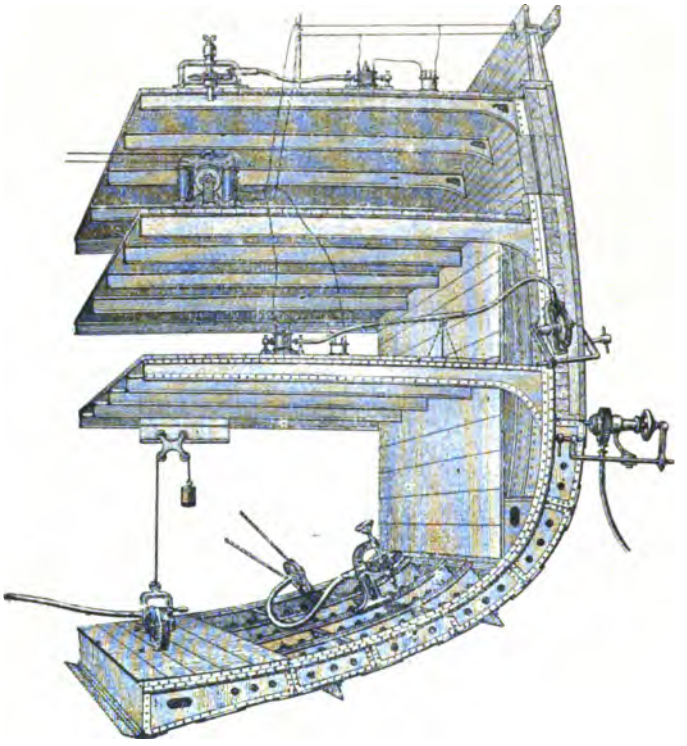
Breveté S.G.D.G.

FLEXIBLES FRANÇAIS

De toutes longueurs et de tous diamètres
pour le travail des Métaux

PERÇAGE, FRAISAGE

Plus de **5,000** applications diverses



Plus de **5,000** applications diverses

MARCEL FONREAU

INGÉNIEUR

Fournisseur de la Marine et de la Guerre

PARIS — *54, rue de Chabrol, 54* — PARIS

MAISON FONDÉE EN 1886

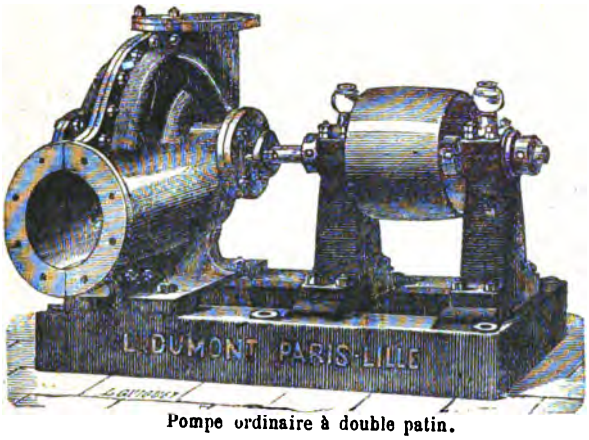
MAISON FONDÉE EN 1863

POMPES CENTRIFUGES

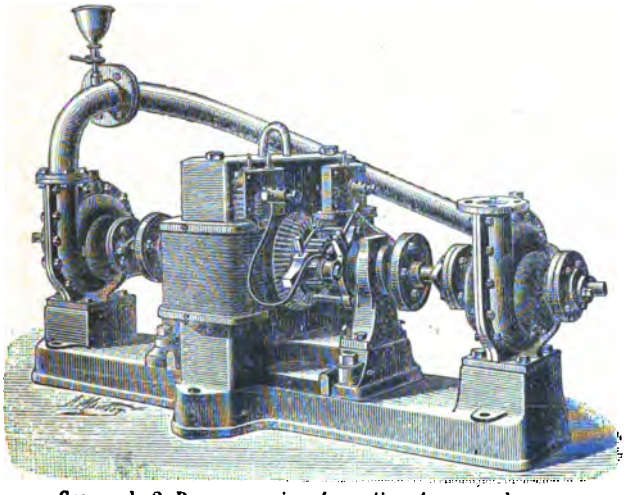
L. DUMONT

PARIS, 55, rue Sedaine. | LILLE, 100, rue d'Isly.

Exposition Universelle, PARIS 1889
MÉDAILLE D'OR



Pompe ordinaire à double patin.



Groupe de 2 Pompes conjuguées actionnées par dynamo pour élévation de 20 à 30 mètres.

Exposition Universelle, PARIS 1889
MÉDAILLE D'OR

Supériorité justifiée par **10.000** *applications.*

ENVOI FRANCO DU CATALOGUE

GÉNÉRATEURS BELLEVILLE

PREMIÈRES ÉTUDES 1849 — 1896 DERNIERS MODÈLES

BREVETÉS S. G. D. G.

Spécimens d'applications à bord de bâtiments de haute mer.

Marine militaire française

MILAN	Eclaireur d'escadre de	4000 chev.
VOLTIGEUR	Aviso de	1000 »
HIRONDELLE	Eclaireur d'escadre de	2100 »
CROCODILE	Canonnière de	450 »
ACTIF	Aviso de	450 »
Amiral RIGAULT-de-GENOUILLY	Croiseur de	2100 »
ALGER	Croiseur de	8000 »
LATOUCHE-TRÉVILLE	Croiseur cuirassé de	7400 »
CHANZY	Croiseur cuirassé de	7400 »
Amiral-CHARNER	Croiseur cuirassé de	7400 »
ABERVRACH	Remorqueur de	170 »
CAUDAN	Aviso de	600 »
LEGER	Aviso torpilleur de	2200 »
LEVRIER	Aviso torpilleur de	2200 »
BRENNUS	Cuirassé d'escadre de	14000 »
AMIRAL-TRÉHOUART	Garde-côtes cuirassé de	7500 »
BRUIX	Croiseur cuirassé de	8800 »
BUGEAUD	Croiseur cuirassé de	9000 »
DESCARTES	Croiseur de	8500 »
BOUVET	Cuirassé d'escadre de	14000 »
POTHUAU	Croiseur de	10000 »
PASCAL	Croiseur de	8500 »
GALILÉE	Croiseur de	6600 »
CATINAT	Croiseur de	9000 »
CHARLEMAGNE	Cuirassé d'escadre de	14500 »
LAVOISIER	Croiseur de	6600 »
GAULOIS	Cuirassé d'escadre de	14500 »
SAINT-LOUIS	Cuirassé d'escadre de	14500 »
PROTET	Croiseur de	9000 »

Comp. des Chemins de fer de l'Ouest
(Service de Dieppe à New-Haven)

TAMISE	Paquebot à gr. vitesse de	4500 chev.
MANCHE	Paquebot à gr. vitesse de	4500 »

Messageries maritimes

ORTEGAL	Cargoboat de	1800 chev.
SINDH	Paquebot postal de	2400 »
AUSTRALIEN	Paquebot postal de	7500 »
POLYNESIEN	Paquebot postal de	7500 »
ARMAND-BEHIC	Paquebot postal de	7500 »
VILLE-DE-LA-CIOTAT	Paquebot postal de	7500 »
ERNEST-SIMONS	Paquebot postal de	6000 »
CHILI	Paquebot postal de	6000 »
CORDILLÈRE	Paquebot postal de	6000 »
LAOS	Paquebot postal de	6000 »
PAQUEBOT 109	Paquebot postal de	6000 »

Marine Russe

MININE	Frégate cuirassée de	6000 chev.
GROZIASTCHY	Canonnière de	2000 »
MAREVO	Yacht Impérial de	200 »
STRELA	Yacht Impérial de	1600 »
GREMIASCHY	Canonnière de	2500 »
OTVAJNI	Canonnière de	2500 »
TZAREWNA	Yacht Impérial de	800 »
STANDARD	Yacht Impérial de	15000 »
ROSSYA	Croiseur de	14500 »
SVETLANA	Croiseur de	8500 »
VERNY	Navire-école de	700 »
KHERSON	Bâtiment de la flotte volontaire Russe de	12500 »
X***	Croiseur de	11000 »
X***	Croiseur de	11000 »
X***	Bateau transport de torpilles de	1000 »

Marine royale Anglaise

SHARPSHOOTER	Contre-torpilleur de	3500 chev.
POWERFUL	Croiseur cuirassé de	25000 »
TERRIBLE	Croiseur cuirassé de	25000 »
GLADIATOR	Croiseur de	10000 »
ARROGANT	Croiseur de	10000 »
FURIOUS	Croiseur de	10000 »
VINDICTIVE	Croiseur de	10000 »
CANOPUS	Cuirassé de	13500 »
GLORY	Cuirassé de	13500 »
GOLIATH	Cuirassé de	13500 »
ALBION	Cuirassé de	13500 »
OCEAN	Cuirassé de	13500 »
NIOBE	Croiseur de	16500 »
DIADEM	Croiseur de	16500 »
ANDROMEDA	Croiseur de	16500 »
EUROPA	Croiseur de	16500 »
ARGONAUT	Croiseur de	18000 »
ARIADNE	Croiseur de	18000 »
AMPHITRITE	Croiseur de	18000 »
SPARTIATE	Croiseur de	18000 »

Marine Japonaise

CHIYODA	Croiseur de	5700 chev.

Marine Chilienne

O'HIGGINS	Croiseur de	16000 chev.

Marine Autrichienne

BUDA-PEST	Croiseur de	8500 chev.

Marine Italienne

GARIBALDI	Croiseur de	13000 chev.

ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE

Northern Steamship Company: North-West et North-Land, Paquebots de chacun 7000 chevaux.
Yachts : Shearwater, Coryell, Wild-Duck et Sultana,

Adresse télégraphique : BELLEVILLE, Saint-Denis-sur-Seine

Envoi *franco* de Renseignements généraux

CHAUDIÈRES MARINES

COURS DE MACHINES A VAPEUR

PROFESSÉ A L'ÉCOLE D'APPLICATION DU GÉNIE MARITIME

PARIS. — IMPRIMERIE E. BERNARD ET Cie

23, RUE DES GRANDS-AUGUSTINS, 23

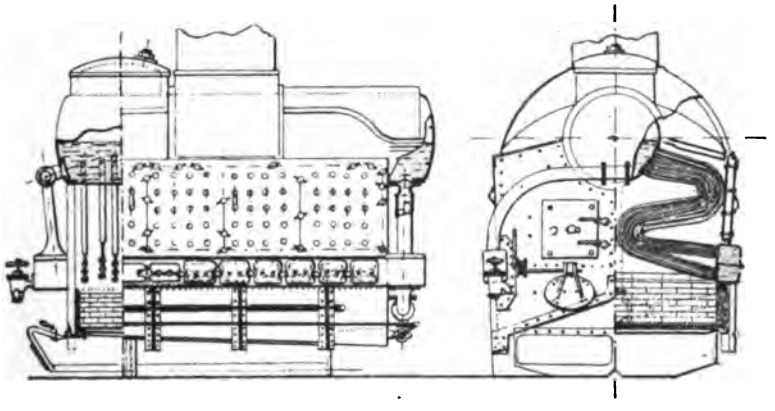
L.-E. BERTIN

DIRECTEUR DES CONSTRUCTIONS NAVALES

CHAUDIÈRES MARINES

COURS DE MACHINES A VAPEUR

PROFESSÉ A L'ÉCOLE D'APPLICATION DU GÉNIE MARITIME



PARIS

E. BERNARD et Cie, IMPRIMEURS-EDITEURS

53 ter, *Quai des Grands-Augustins*, 53 ter

—

1896

Eng 2758.96.3

HARVARD COLLEGE LIBRARY
FROM THE LIBRARY OF
FRANCIS PEABODY MAGOUN
THE GIFT OF HIS SON
MAY 8, 1929

B

INTRODUCTION

LOIS PRINCIPALES
DE LA NAVIGATION A VAPEUR

ET

DISPOSITION GÉNÉRALE
DES CHAUDIÈRES ET DES MACHINES MARINES

CHAPITRE PREMIER

LOIS PRINCIPALES
DE LA NAVIGATION A VAPEUR

NOTATIONS EMPLOYÉES DANS CE CHAPITRE

A — Approvisionnement de charbon, en tonnes.

B^2 — Surface immergée du maître-couple du navire, en mètres carrés.

C — Consommation de charbon par cheval et par heure, en kilogrammes.

D — Distance franchissable, en milles marins, sans déduire de l'approvisionnement la consommation des services auxiliaires.

D' — Distance franchissable, en milles marins, déduction faite de la consommation des services auxiliaires.

F — Puissance de la machine, en chevaux indiqués sur les pistons.

I — Coefficient $\frac{M_1^3}{CV^3}$, par lequel il faut multiplier le coefficient N, pour obtenir la distance D.

M — $V = M\sqrt[3]{\frac{F}{B^2}}$,

M_1 — $V = M_1\sqrt[3]{\frac{F}{P^2}}$.

Coefficients d'utilisation tirés des formules

N — Coefficient de distance franchissable, sans tenir compte de la consommation des services auxiliaires.

N' — Coefficient de distance franchissable, déduction faite de la consommation des services auxiliaires.

P — Déplacement des navires, en tonneaux.

Q — Ensemble des poids consacrés à la propulsion, combustible compris, en tonnes.

R — Résistance de l'eau à la marche du navire.
V — Vitesse du navire, en nœuds ou milles à l'heure.
λ — Rapport des dimensions homologues de deux navires semblables. ou de celles d'un navire à celles d'un modèle.
c — Course des pistons dans une machine à vapeur, en mètres.
d — Diamètre du piston de la machine, en centimètres.
n — Nombre de tours de la machine par minute.
p — Ordonnée moyenne ou pression moyenne de la vapeur sur les pistons, totalisée en kilogrammes par $^{k}/^{m^2}$.
m — Poids d'un appareil moteur par cheval.
q — Consommation par 24 heures des services auxiliaires.
s, s_1 — Coefficients constants dans la loi de similitude dynamique.
u — Rendement mécanique de la machine (Rapport de la puissance F_1, mesurée au frein sur l'arbre à la puissance F).
u_1 — Rendement de l'hélice (Rapport du travail utile de l'hélice à la puissance F_1).

---

1. — *Adoption des moteurs à vapeur dans la marine.* — Dans la marine de guerre, la machine à vapeur a totalement supplanté la voilure, dans la marine de commerce, la substitution est moins complète; mais la navigation à la voile, exclue de certaines mers et dépouillée de la plupart des frets, ne tient plus qu'une place secondaire.

Conservée longtemps à titre de moteur accessoire, la voilure tend à disparaître sur tous navires à vapeur, depuis l'adoption des hélices multiples mues par des machines indépendantes. Cette dernière évolution est presque complètement accomplie pour la marine de guerre.

Les résultats de l'adoption des machines à vapeur, en considérant seulement la navigation, et non les évolutions et les manœuvres de combat, consistent dans un grand accroissement de la vitesse et dans la régularité plus grande des traversées.

§ 1. — De la Vitesse.

2. — *Vitesse des navires à vapeur.* — La vitesse, dans la navigation à voiles, dépendait de tant de cause indépendantes des navires, qu'il est difficile d'assigner des valeurs un peu précises, même à la vitesse moyenne; après avoir filé douze nœuds (1) et même quatorze nœuds,

1. — Le nœud correspond à un mille marin parcouru à l'heure; le mille marin est la longueur d'une minute du méridien terrestre = $1851^{m},8$.

pendant un jour ou plusieurs jours consécutifs, le bâtiment à voiles, courant des bordées à trois ou quatre nœuds contre une petite brise debout, peut gagner un nœud à peine contre le vent; il peut même perdre, ou bien encore rester immobile, cloué sur place par le calme, pendant un temps indéterminé.

En général, on admettait, il y a trente ou quarante ans, que quatre nœuds étaient une belle vitesse pour l'ensemble d'une longue traversée à la voile. Depuis lors, l'étude des vents régnants a fait faire de très grands progrès à la navigation à voiles, stimulée par la concurrence de la vapeur; on a atteint des vitesses moyennes de plus de six nœuds sur les clippers qui vont de Chine en Europe par le Cap de Bonne-Espérance; on a même dépassé huit nœuds entre la France et la Nouvelle-Calédonie, sur nos vieux vaisseaux transformés, pour lesquels on n'aurait guère prévu de semblables prouesses, au temps de leur service en escadre.

La marine à vapeur a débuté à la vitesse de la marine à voiles. Les six nœuds du *Sphinx* entre Alger et Toulon, en 1830, marquèrent la première étape.

Actuellement, tous les cargos ont des vitesses d'au moins dix nœuds. Les grands paquebots atteignent des vitesses moyennes de 21 nœuds (1) dans la belle saison, sur la ligne de New-York, après avoir donné jusqu'à 23 nœuds aux essais. Les navires de guerre atteignent également 23 nœuds, mais leurs moteurs n'auraient pas une endurance suffisante pour un parcours de 3200 milles à 21 nœuds de vitesse. Nous ne parlons pas des vitesses de certains petits navires de destination très spéciale et de très court rayon d'action, yachts de course et surtout torpilleurs de 30 nœuds.

Ainsi la navigation à vapeur a fait, en vitesse, des progrès bien autrement grands que la navigation à voiles. Ces progrès qui se poursuivent tous les jours, à mesure que se perfectionnent les arts du métallurgiste et du constructeur, marchent à peu près parallèlement pour la marine de guerre et pour la marine de commerce. Il y a une raison évidente, d'ailleurs, pour qu'il en soit ainsi, car entre certains paquebots et certains navires de guerre, il existe la lutte du poursuivi et du poursuivant.

La vitesse à la vapeur est, pour tous les navires, une qualité très coûteuse; on se limite en général au minimum imposé par les lois de la concurrence commerciale entre les armateurs, et par les exigences de la rivalité entre les diverses marines de guerre.

1. — Quand on arrive à ces grandes vitesses, la durée du jour solaire varie notablement dans les parcours, selon qus l'on court vers l'est ou vers l'ouest, d'où une différence facile à calculer en fonction de la latitude, entre les durées apparentes des traversées dans un sens ou dans l'autre. A l'équateur, la vitesse du soleil est de 900 nœuds.

3. — *Coefficient d'utilisation; ses deux formes.* — Les formules élémentaires, qui servent dans la pratique à déterminer la vitesse des navires en fonction de la puissance de la machine, sont les suivantes :

Soit F le travail brut de la vapeur sur les pistons, proportionnel à l'effort moyen $\frac{1}{4}\pi d^2 p$ et à l'espace parcouru par seconde $2cn$; le travail employé à la propulsion, en appelant u le rendement de la machine et u_1 le rendement de l'hélice, est égal à :

$$u u^1 F.$$

D'autre part, si R est la résistance de l'eau sur la carène et V la vitesse du navire, le travail résistant est :

$$RV.$$

On a donc, en posant l'égalité du travail moteur et du travail résistant,

$$RV = u u_1 F. \tag{1}$$

Pour un navire donné, marchant à des vitesses variables, on admet la loi expérimentale approchée,

$$R = KV^2. \tag{2}$$

D'autre part, pour des navires semblables mais de grandeur différente, la loi théorique de la similitude dynamique enseigne que R est proportionnel au cube du rapport λ des dimensions linéaires, quand V^2 est proportionnel à λ; on a ainsi les deux relations :

$$V^2 = s\lambda$$
$$R = s_1\lambda^3$$

on tire de là :

$$\frac{R}{V^2} = \frac{s_1}{s}\lambda^2$$

$$R = \frac{s_1}{s}\lambda^2 V^2.$$

Le coefficient K, indépendant de V, doit donc être proportionnel à λ^2, et l'on peut écrire, soit,

$$K = kB^2, \tag{3}$$

B^2 étant la surface immergée du maître couple, soit

(3 *bis*) $$K = k_1 P^{\frac{2}{3}},$$

en rapportant les dimensions au déplacement P. De là, les deux relations :

(4) $$k B^2 V^3 = u u_1 F,$$

(4 *bis*) $$k_1 P^{\frac{2}{3}} V^3 = u u_1 F.$$

Ces relations donnent, pour la valeur de V, les deux expressions :

(5) $$V = \sqrt[3]{\frac{u u_1}{k}} \sqrt[3]{\frac{F}{B_2}}$$

(5 *bis*) $$V = \sqrt[3]{\frac{u u_1}{k_1}} \sqrt[3]{\frac{F}{P^{\frac{2}{3}}}}.$$

Le travail brut F est connu ; la vitesse V se mesure dans les essais. On a ainsi, en bloc, la valeur du coefficient constant, exprimé sous les deux formes :

$$M = \sqrt[3]{\frac{u u_1}{k}},$$

$$M_1 = \sqrt[3]{\frac{u u_1}{k_1}},$$

que l'on nomme *coefficient d'utilisation* du navire.

On n'a d'ailleurs aucun moyen d'isoler la valeur des facteurs u, u_1, k ou k_1, que nous n'avons fait intervenir que pour montrer la signification du coefficient d'utilisation.

Les valeurs de M et de M_1 varient pour un même navire, parce que K, dans la formule (2), change un peu avec la vitesse V, et que u et u_1 varient eux-mêmes avec la vitesse de rotation de la machine.

D'autre part, sur des navires semblables et de dimensions différentes, l'expérience prouve que, pour des vitesses proportionnelles à $\sqrt{\lambda}$, la résistance réelle, comparée à celle que donne la loi de similitude, est plus grande pour les petits bâtiments et plus faible pour les grands. D'ailleurs, les navires ne sont pas semblables entre eux et leurs vitesses V ne satisfont nullement à la condition exigée par la loi de

similitude. Pour toutes ces raisons, dans l'expression de la vitesse V donnée par l'une ou l'autre des deux formules

$$V = M\sqrt[3]{\frac{F}{B^2}}, \tag{6}$$

$$V = M_1\sqrt[3]{\frac{F}{P^{\frac{1}{3}}}}. \tag{6 bis}$$

il faut considérer M et M_1 comme des coefficients variables et purement empiriques ; on ne peut les connaître avec certitude, pour un bâtiment projeté, que si l'on a les résultats des essais d'un navire à peu près identique, à des vitesses presque pareilles, et sur une mer tout à fait semblable, à défaut de calme plat. Suivant quelques expérimentateurs, il faut de plus que la profondeur de la mer soit la même dans les deux cas.

La détermination de la vitesse en fonction de la puissance exige, comme on voit, la connaissance d'un très grand nombre de valeurs de M et de M_1, ou plutôt la connaissance d'un grand nombre de courbes de M et de M_1 en fonction de la vitesse. On peut faciliter l'étude, dans les cas les plus difficiles, par exemple pour les navires sortant des formes ordinaires ou destinés à atteindre des vitesses inusitées, en exécutant, sur un modèle, des expériences de traction dans les conditions de vitesse fixées par la loi de la similitude dynamique; mais la discussion des résultats donnés par ces expériences demande elle-même des recherches et des comparaisons minutieuses.

Le tableau de la page 9 donne quelques valeurs de M et de M_1 relatives toutes à des bâtiments de guerre de construction récente. On remarquera que ces valeurs diminuent sensiblement quand on passe des grands navires aux petits ; la résistance est donc proportionnelle à une puissance de λ un peu inférieure à la deuxième.

L'expérience du *Forban* a conduit M. Normand à penser que la valeur de M et de M_1 présente, sur chaque navire, un minimum au delà duquel elle se relève indéfiniment ; la vitesse à laquelle ce minimum correspond, atteinte vers 20 nœuds pour les torpilleurs de 125 tonneaux, serait proportionnelle approximativement à la racine sixième du déplacement, c'est-à-dire à $\sqrt{\lambda}$, si la loi observée sur les petits bâtiments peut être étendue à tous les navires.

La formule (6 bis) conduit à une conséquence curieuse, quand on y fait l'hypothèse de M_1 constant, et que, de plus, on suppose une fraction constante du déplacement P du navire consacrée à la propulsion.

Nom du bâtiment	Vitesse V	Puissance F	Coefficients M	Coefficients M_1	Déplacement aux essais
Magenta	16n,21	10705ch,5	3,841	5,807	10929,0
Terrible.	14,51	5363 ,8	4,064	6,043	7626,6
Jemmapes	15,68	9118 ,0	3,539	5,286	6545,8
Cocyte	11,27	1439 ,8	3,467	5,210	1697,6
Mitraille	10,34	745 ,9	3,505	5,399	1095,4
Dupuy-de-Lôme . . .	19,73	13186 ,1	3,708	5,794	6107,4
Cécille	19,44	10868 ,2	3,695	5,950	5501,9
Sfax.	16,75	7060 ,0	3,705	5,674	4542,7
Friant	18,89	9438 ,6	3,605	5,561	3739,5
Troude	20,91	6433 ,5	3,562	6,000	1874,4
Condor.	17,51	3334 ,5	3,654	5,723	1251,9
Lévrier.	18,88	2226 ,1	3,157	5,486	455,6
Bombe	19,20	1970 ,3	3,080	5,529	323,0
Forban	31,03	4175 ,0	3,148	5,664	128,3
Chevalier	26,72	2956 ,5	2,972	5,324	113,3

Le poids des machines est, pour des machines satisfaisant aux principes de la similitude statique, proportionnel au cube des dimensions. La puissance, qui est donnée par l'expression $N = 3{,}4907\ d^2 c n p$, est seulement proportionnelle au carré des dimensions d^2, quand la vitesse moyenne des pistons cn et la pression p de la vapeur sont les mêmes. La puissance des machines est donc proportionnelle en principe à la puissance deux tiers de leur poids. Donc, dans les hypothèses où nous sommes placés, le rapport de F à $P^{\frac{2}{3}}$ est constant, et la vitesse V est par suite constante d'après les formules (6), (6bis), quelle que soit la grandeur du bâtiment. Il n'y a donc rien de contraire aux principes élémentaires, dans les très grandes vitesses actuellement atteintes sur de très petits bâtiments.

Nous avons admis plus haut que la vitesse moyenne du piston cn était constante ; cette hypothèse ne correspond pas au cas de la similitude complète entre deux appareils de propulsion comprenant machine et hélice. La relation exacte serait $cn = \sqrt{s}\ \sqrt{\lambda}$ pour une même pression de vapeur ; mais en réalité la machine des petits bâtiments tourne plus vite que l'indique la loi de similitude, et la relation $cn =$ constante est plus rapprochée de la vérité que $cn = \sqrt{s}\ \sqrt{\lambda}$.

§ 2. — De la distance franchissable.

4. — *Calcul de la distance franchissable.* — La distance franchissable à la vapeur, seconde propriété des navires, non moins importante que la vitesse, dépend de l'approvisionnement de charbon et de la vitesse à laquelle la distance doit être franchie. Soit C la consommation de charbon par cheval et par heure; pour une puissance F, la consommation est FC; soit V la vitesse correspondante, en milles à l'heure, la consommation par mille parcouru est

$$\frac{FC}{V};$$

pour une distance D, la dépense de combustible est donc :

$$\frac{FC}{V} \times D,$$

qui doit être égale à l'approvisionnement en soute A, d'où :

$$D = A \times \frac{V}{FC} \tag{7}$$

Si l'on tire de l'équation (6 *bis*) le rapport de V à F, pour éliminer F, on a :

$$\frac{V}{F} = M_1^3 \frac{1}{P^{\frac{2}{3}}} \frac{1}{V^3}; \tag{8}$$

on voit de suite que, pour un navire donné, avec A constant et C constant, la distance franchissable D, donnée par la formule

$$D = \frac{M_1^3}{C} \times \frac{A}{P^{\frac{2}{3}}} \times \frac{1}{V^2}, \tag{9}$$

est inversement proportionnelle au carré de la vitesse employée à la parcourir.

Si l'on compare deux navires identiques, mais de vitesses différentes, supposés munis de moteurs appropriés aux vitesses qu'ils doivent fournir, on reconnaît que la loi de diminution qui lie D à V est encore plus rapide que la loi des carrés.

En effet, si la puissance maximum de la machine diminue et passe de F à F' de manière à être en rapport avec la vitesse, et si l'ensemble

des poids consacrés à la propulsion, tant pour le moteur que pour le combustible, est constant, ou aura :

(10) $$A + mF = Q$$

(10 *bis*) $$A' + m F' = Q$$

On a ainsi :

$$A' = A + m(F - F');$$

Si l'on suppose que le poids du charbon A est égal au poids du moteur mF, condition assez fréquente, et si la vitesse du second navire est la moitié de celle du premier, ce qui fait $F' = \frac{F}{8}$, on aura :

$$A' = A + A\left\{1 - \left(\frac{1}{2}\right)^3\right\};$$

A' est donc presque double de A. Dans ces conditions, la distance franchissable à toute vitesse, au lieu d'être multipliée par 4, est multipliée par 8. A une vitesse égale, la distance franchissable du second navire est à peu près double de celle du premier.

La vitesse à laquelle un navire peut entreprendre une traversée dépendant de son approvisionnement de charbon A, on arrive à cette conclusion en apparence paradoxale, que, pour un poids constant Q consacré à la propulsion, la vitesse stratégique des navires de guerre est d'autant plus grande que la puissance maximum F donnée à la machine est plus faible.

Considérons maintenant des navires différents marchant tous à la même vitesse, et supposons que, sur tous, l'approvisionnement de charbon A soit une même fraction o du déplacement P; la valeur de D peut s'écrire, en remplaçant A par oP dans (9),

(12) $$D = \frac{o\,M_1^3}{C\,V_1^3}\,P^{\frac{1}{3}}.$$

Ainsi, quand on suppose une fraction constante attribuée au charbon, dans la distribution du déplacement du navire entre les différents poids, la distance franchissable croît comme la racine cubique du déplacement.

Tandis que les grandes vitesses n'exigent pas les grands déplacements, les grandes distances franchissables les imposent.

5. — *Coefficient de distance franchissable.*— En remplaçant o par sa valeur $\frac{A}{P}$ dans l'équation (12), on obtient :

$$D = \frac{M_1^{\frac{2}{3}}}{CV^2} \frac{A}{P^{\frac{1}{3}}} \tag{13}$$

la distance franchissable des navires, quand on suppose V constant, et que l'on néglige les variations de M_1 et de C, est proportionnelle au rapport N, de l'approvisionnement de charbon A, à la puissance deux tiers du déplacement,

$$N = \frac{A}{P^{\frac{2}{3}}}, \tag{14}$$

qui peut s'appeler *coefficient de distance franchissable.*

Pour les navires de guerre, qui marchent à des vitesses très variables, il est depuis longtemps dans l'usage de calculer la distance franchissable à la vitesse de 10 nœuds, en négligeant la consommation des services auxiliaires; dans ces conditions, en supposant $M_1 = 5{,}75$ et $C = 0^k{,}8$, on a, le tonneau étant pris pour unité,

$$\frac{M_1^{\frac{2}{3}}}{CV^2} = 2344,$$

$$D = 2344\,N. \tag{15}$$

En attribuant à N les trois valeurs 0,75 — 1,50 — 3,00, qui suffisent à peu près pour les gardes-côtes, les cuirassés d'escadre et les croiseurs, on a pour D les trois valeurs 1758 milles, 3516 milles, 7032 milles. Le coefficient N est, comme on voit, une des données qui caractérisent le plus nettement la destination d'un navire de guerre.

Les paquebots prennent un approvisionnement de charbon A en rapport avec la longueur connue de leurs traversées et la vitesse réelle de leur service, mais en dépassant beaucoup ce qu'indiquerait la formule (13), afin de tenir compte des conditions défavorables de temps qui peuvent se rencontrer en route.

Pour les courtes traversées, par exemple entre Alger et Toulon, on prend le double de l'approvisionnement théoriquement nécessaire. Pour les longues traversées, on se contente de beaucoup moins ; ainsi un transatlantique, qui dépense 1700 à 1800 tonneaux de charbon dans une traversée, par beau temps, entre le Havre et New-York, prend 2300 tonneaux de soutes, soit environ un tiers en sus de la dé-

pense prévue. On a vu des navires restés à court de charbon, dans une longue traversée, à la suite d'un mauvais temps persistant; ainsi un paquebot, parti de Colombo pour Aden, en mousson de N.-O, a dû rebrousser chemin, après plus des deux tiers de la traversée accomplis, pour rentrer à Colombo avec sa voilure aidée de la machine, et refaire son plein de charbon. Cet exemple montre que l'adoption des hélices multiples ne compense pas la suppression de la voilure au point de vue de la sécurité, si l'on n'a pas le soin d'accroitre en même temps l'approvisionnement de combustible.

Dans la marine de guerre, on alloue au mécanicien une quantité de charbon supérieure du dixième à la consommation aux essais. Cette augmentation peut corriger les différences dans la qualité du charbon et dans l'habilité des chauffeurs, mais non tenir compte des conditions de mer en cours de traversée. Nous aurons à revenir sur cette question importante, de l'effet de l'état de la mer dans la navigation à vapeur.

6. — *Consommation de charbon des services auxiliaires.* — Les valeurs du coefficient N, devant entrer dans la formule (15), seront données page 33, pour quelques-uns des bâtiments déjà considérés au point de vue de M et M_1; il a été tenu compte, dans le calcul de N, des valeurs véritables de M_1, de C, et approximativement de la consommation des services auxiliaires du bord. Cette dernière correction est importante, car, sur quelques cuirassés, les appareils auxiliaires n'enlèvent pas, à la machine, moins de 5 à 6 tonneaux de charbon par jour; elle se fait de la manière suivante :

Soit q la consommation de charbon des services accessoires, en tonneaux par 24 heures; le navire étant supposé constamment en marche, la consommation par heure en est la vingt-quatrième partie, ce qui porte la consommation par mille parcouru à

$$\frac{q}{24\,V},$$

et la consommation totale, pour une distance D, à

$$\frac{q\,D}{24\,V}.$$

Nous supposerons que l'on peut, sans trop d'erreur, donner à D, dans ce terme correctif, la valeur (15) que nous écrirons simplement :

(15 *bis*) $$D = 2400\,N.$$

L'approvisionnement A, pour la propulsion, est ainsi réduit à :

$$A' = A - q\frac{D}{24\,V} = A - q\frac{2400\,N}{24\,V} = A - 100\,q\frac{N}{V}. \tag{16}$$

Par suite, la valeur de N est diminuée et devient N':

$$N' = \frac{A'}{P_i^{\frac{1}{3}}} = N - 100\,\frac{q}{P}\frac{N\,P_i^{\frac{1}{3}}}{V}. \tag{17}$$

La consommation q est à peu près proportionnelle au déplacement des navires, et on peut poser :

$$\frac{q}{P} = 0{,}0005, \tag{18}$$

ce qui suppose une consommation d'un tonneau par jour sur un croiseur de 2000 tonneaux, et de 6 tonneaux sur un cuirassé de 12000 tonneaux.

Faisons en même temps V = 10 nœuds, nous avons :

$$N' = N - 0{,}005\,N\,P_i^{\frac{1}{3}} = N\,(1 - 0{,}005\,P_i^{\frac{1}{3}}). \tag{19}$$

Le coefficient de distance franchissable subit donc une réduction d'autant plus forte que le navire est plus grand; il tombe à 0,925 N sur un navire de 11600 tonneaux.

7. — *Vitesse économique. Distance franchissable réelle. Action de la voilure.* — La consommation par mille totale de l'appareil propulseur et des services auxiliaires est :

$$\frac{FC + \frac{q}{24}}{V} = \frac{FC}{V} + \frac{q}{24\,V} = \frac{P_i^{\frac{2}{3}}\,V^2}{M_i^2}\,C + \frac{q}{24\,V}. \tag{20}$$

Cette consommation, en raison de la forme de ses deux termes, a nécessairement un minimum. La valeur de V correspondant à ce minimum, C et M_i étant toujours considérés comme des constantes, serait déterminée par l'équation :

$$2\,\frac{C\,P_i^{\frac{2}{3}}}{M_i^2}\,V - \frac{q}{24\,V^2} = 0, \tag{21}$$

d'où, en donnant à q la valeur 0,0005 P, à M_1 la valeur de 5,75, à C la valeur de 0,80, on peut tirer

$$V = \sqrt[3]{\frac{q M_1^3}{48 C P^{\frac{2}{3}}}} = \sqrt[3]{\frac{M_1^3 P^{\frac{1}{3}}}{96000 C}} = 0{,}135 \sqrt[9]{P}.$$

En réalité, la vitesse économique dépend surtout de la valeur de C, qui augmente beaucoup aux très faibles valeurs de V; sa détermination exigerait le tracé séparé des deux courbes des consommations principales et des consommations accessoires par mille :

(22) $$y = \frac{P^{\frac{2}{3}} V^2}{M_1^2} C,$$

(23) $$y_1 = \frac{q}{24 V},$$

dont la seconde est une hyperbole équilatère.

On tracerait une courbe résultante, avec la somme des ordonnées y et y_1, et on en chercherait la tangente horizontale.

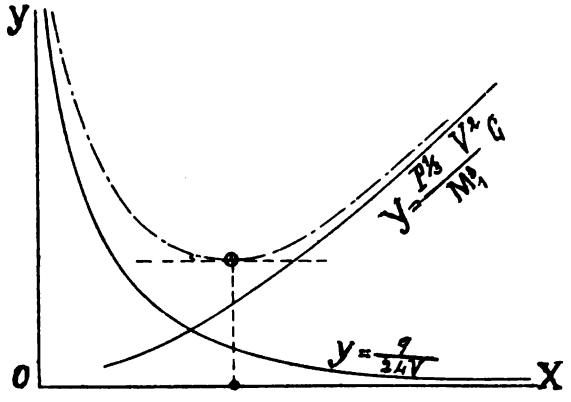


Fig. 1

Le devis d'armement des navires de guerre comporte, d'après sa forme, une distinction entre le charbon des services auxiliaires et celui destiné à la propulsion. La séparation réelle est nécessairement impossible à faire, puisque le rapport entre les deux genres de consommation varie avec la vitesse de route et avec le temps passé au mouillage. Dans certaines campagnes, la consommation des appareils auxiliaires atteint 25 et même 35 % de l'approvisionnement total, en raison des consommations au mouillage.

Les distances franchissables à 10 nœuds de vitesse, D', calculées en tenant compte des consommations des services auxiliaires à l'aide de la formule (17), sont données par le tableau de la page 17.

Les déplacements portés dans ce tableau se rapportent aux derniers devis d'armement des navires considérés; on s'explique ainsi pourquoi le tableau de la page 9. qui se rapporte aux essais de recette, présente quelques différences avec lui. Au déplacement de 6301 tonneaux, prévu par le plan, l'approvisionnement A du *Dupuy-de-Lôme* est de 619 tonneaux seulement, correspondant à D' = 4363; une observation du même genre serait à faire pour plusieurs autres des navires cités, dont une partie de l'approvisionnement est en surcharge.

Pour se rendre compte des parcours géographiques permis aux bâtiments de guerre, à la modeste vitesse de 10 nœuds, en s'en tenant aux conclusions infiniment trop optimistes de la formule (15), on peut consulter le tableau suivant de distances géographiques en milles marins.

DE CHERBOURG A			DE TOULON A		
Brest	189	1282	Funchal	1316	1323 Alexandrie
Dunkerque	161	1498	Santa-Cruz	1418	2535 Massouah.
Wilhelmshaven.	478	2271	Saint-Louis	2159	4924 Colombo
Hambourg	524	2524	Halifax.	3375	5282 St-Pierre
Christiania	760	3066	New-York.	3384	5530 Pondichéry
Kiel	917	3950	Fort-de-France	3950	7150 Saïgon
Dantzig	1118	5012	Rio-Janeiro	5012	7885 Hong-Kong
Riga	1303	5913	Cape-Town	5913	9858 Yokohama
Cronstadt	1549	6012	Buenos-Ayres.	6012	9746 Sydney
De Toulon à San-Francisco		13468	par le cap de Bonne-Espérance.		
		13231	par le détroit de Magellan		
De Brest à Nouméa		12759	par le cap de Bonne-Espérance		
De Dunkerque à Fou-Tchéou		13347	—		

Ces tableaux permettent de se rendre compte assez facilement du rayon d'action des flottes à vapeur. On voit que les cuirassés ne peuvent pas faire le voyage d'Alexandrie, les gardes-côtes celui de Kiel, les croiseurs celui d'Halifax ou de New-York, aller et retour, même en n'intercalant ni opération militaire, ni manœuvres, ni croisières à vitesse très réduite. On comprend ainsi comment la voilure a été conservée longtemps à titre de moteur auxiliaire, même après qu'on avait cessé en pratique de l'établir jamais sur les cuirassés d'escadre ou de station, et même sur les croiseurs, et que tous les navires de guerre, comme les paquebots, ne faisaient plus que promener sur les mers une mâture rendue inutile pour les facilités du ravitaillement de charbon en temps de paix.

Nom des batiments	Données principales				Coefficients calculés					
	P	A	M_1	C	I	N	IN = D	N'	IN' = D'	F
Magenta	10850t, 8	615t,0	6,309	0t929	2708	1,255	3392	1,116	3016	1952ch
Terrible	7610, 6	400, 0	6,761	1,584	1951	1,033	2015	0,931	1816	1250
Indomptable	7585, 5	400, 0	6,761	1,608	1922	1,036	1991	0,934	1795	1250
Jemmapes	6592, 0	300, 0	5,824	0,681	2901	0,853	2475	0,773	2243	1780
Cocyte	1714, 0	72, 0	5,546	0,941	1812	0,503	911	0,473	857	840
Dupuy-de-Lôme . . .	6582, 0	900, 0	5,920	0,750	2766	2,562	7086	2,322	6423	1692
Isly	4477, 0	581, 0	6,056	0,613	3623	2,138	7746	1,962	7108	1220
Friant	3739, 0	585, 0	5,750	0,927	2050	2,428	4977	2,240	4592	1267
Lalande	1926, 0	288, 0	5,797	0,921	2115	1,860	3934	1,744	3689	795
Lévrier	504, 5	95, 0	4,842	0,740	1534	1,499	2299	1,439	2207	558
Bombe (à 14 nœuds) . .	419, 7	105, 0	5,323	0,936	822	1,872	1539	1,802	1481	1013
Forban (à 14 nœuds) . .	152, 1	18, 0	5,593	0,383	2330	0,631	1470	0,614	1430	447
Chevalier	134, 2	16, 0	4,975	0,360	3420	0,621	2124	0,605	2069	213

2

La mâture constitue, par rapport à la machine, un moteur véritablement léger. Son poids total, sur un grand navire, ne dépasse guère 50 kilogrammes par m. q. de voiles ou 1.500 kilogrammes par m. q. du maître-couple; elle équivaut, pour la vitesse moyenne de six nœuds, à une machine de 3 chevaux et demi par m. q. du maître-couple qui aurait pesé, naguère encore, 500 kilogrammes sans le charbon plus 500 kilogrammes par 1.000 milles parcourus à 6 nœuds. La mâture prenait la supériorité dans ces conditions, pour les traversées de plus de 2.000 milles; elle la garde encore actuellement, sur les clippers comparés aux cargos, pour les longues traversées.

8. — *Courbes et tableaux des puissances, des consommations, etc.* — Toute l'application que nous venons de faire de formules algébriques, telles que (6) et (13), est surtout un exercice utile pour se rendre compte des conditions générales du problème de la navigation et pour préparer les solutions approchées. Dès que l'on entreprend l'étude de la marche des navires à des vitesses variées, il n'est plus possible de se contenter de valeurs constantes, ni pour le coefficient d'utilisation M_1, ni pour la consommation par cheval C, ni par conséquent, pour le coefficient de distance franchissable N; il faut recourir à des courbes donnant les conditions particulières de la marche à chaque allure.

Actuellement ces courbes sont insérées dans le devis descriptif de la machine de chaque bâtiment. Les nombres de tours étant pris pour abscisses, on porte en ordonnées les vitesses, les puissances en chevaux, les quantités de charbon brûlé par heure, et les quantités de charbon brûlé par cheval et par heure. On a ainsi quatre courbes, d'où il est facile de déduire toutes les autres, celle des quantités de charbon brûlé par mille, et celles des coefficients d'utilisation et de distance franchissable.

Le tableau suivant donne les résultats concernant le garde-côte l'*Indomptable*, qui ont servi de modèle pour les devis des autres navires.

NOMBRE de tours n	VITESSE en nœuds V	PUISSANCE en chevaux F	CONSOMMATION DE CHARBON	
			par heure	par ch. et par heure C
30	5,51	280 ch	576 k	1 k 993
40	7,41	568	1005	1,733
50	9,12	1048	1575	1,496
60	10,92	1824	2346	1,286
70	12,58	3024	3345	1,107
80	14,05	4784	4794	1,000
90	14,96	7160	8895	1,207

La lecture de ce tableau conduit aux deux remarques suivantes :

En premier lieu, la consommation de charbon par cheval, qui ne subit que des variations du tiers environ, pour toutes les vitesses comprises entre 10 et 15 nœuds, varie du simple au double quand on descend de 14 à 5 nœuds. Les formules relatives à la distance franchissable ne sont donc applicables aux faibles vitesses, qu'à la condition d'y donner à C les valeurs variables établies par des expériences directes.

En second lieu, la vitesse V est très sensiblement proportionnelle au nombre de tours n; en d'autres termes, l'avance du navire par tour d'hélice est constante, quelle que soit la vitesse. Cette seconde remarque est très importante, parce que la loi approximative qu'elle énonce est générale et se vérifie sur tous les navires à toutes les vitesses, elle suppose seulement une mer calme. Sur mer agitée, l'avance par tour d'hélice diminue beaucoup, contrairement à ce qui se passe pour l'avance des roues à aubes toujours assez constante.

La loi qui précède peut s'exprimer sous une autre forme : la vitesse V étant proportionnelle à n et proportionnelle aussi, d'après l'equation (6), à la racine cubique de F, la puissance F est proportionnelle à n^3. Or d'un autre côté la puissance F est, proportionnelle au produit np du nombre de tours n par la pression moyenne p sur les pistons. Il résulte immédiatement de là que le carré du nombre de tours varie, dans une machine, comme la première puissance de la pression p.

La loi ainsi établie sous la forme :

$$\frac{n^2}{p} = \text{constante}$$

est plus générale que celle de la constance de l'avance, parce qu'elle persiste, même sur mer agitée; quand le navire perd sa vitesse, les hélices continuent à tourner en raison de la pression p, à peu près comme si la mer était calme.

Avec les hélices, le coefficient d'utilisation M_1 diminue aussi beaucoup plus, par l'effet d'une grosse mer, que cela n'avait lieu sur les navires à roues dont les machines se ralentissaient d'elles-mêmes; la consommation de charbon par mille parcouru est ainsi plus grande par mauvais temps. Les partisans attardés des machines à roues ont autrefois invoqué avec énergie, au profit de leur cause, cette différence qui, au fond, est de peu d'importance.

Il est facile de compléter les résultats relatifs à la navigation de l'*Indomptable* par le tableau des consommations par mille, qui figure, du reste, au devis descriptif, par celui des distances franchissables calculées en estimant l'approvisionnement de la machine à 360 tonneaux

sur un approvisionnement total de 400 tonneaux, enfin, par le tableau des coefficients M et M_1 calculés d'après les valeurs de B^e et de P dans es essais. On a ainsi :

NOMBRE de tours n	CONSOMMATION de charbon par mille	DISTANCE franchissable D	COEFFICIENTS D'UTILISATION	
			M	M_1
30	104k6	3441 m.	4,1258	6,1268
40	135,6	2655	4,3757	6,5010
50	172,7	2084	4,3953	6,5901
60	214,8	1675	4,3708	6,4938
70	265,9	1353	4,2580	6,3263
80	341,2	1055	4,0817	6,0642
90	594,5	605	3,8024	5,6493

On trouvera, sur les deux figures 2 et 3, les courbes relatives à la navigation à diverses vitesses pour cinq bâtiments de la marine.

La figure 2 renferme les données relatives à la puissance des machines et aux valeurs M et M_1 de l'utilisation.

La figure 3 renferme les données relatives à la consommation de charbon et à la distance franchissable.

Sur la figure 2, ont été portées quelques courbes de valeur de M calculées pour les petits modèles.

§ 3. — Régularité du service.

9. — *Effet du tangage sur la vitesse.* — Après avoir ainsi traité de la vitesse et de la distance franchissable dans la navigation à vapeur, il convient de dire quelques mots de la régularité du service, qui est un des grands progrès dus à la substitution des machines à la voilure.

Cette régularité est aujourd'hui presque complète, pour les grands paquebots de 10.000 à 18.000 tonneaux de déplacement, à hautes œuvres-mortes, sur lesquels tout est disposé en vue de la bonne tenue à la mer; elle est suffisante encore sur les gros cargos, pour payer l'augmentation du fret par rapport aux clippers; mais, sur les navires de guerre, elle est subordonnée à la grandeur des bâtiments, et aux formes imposées pour les exigences de combat.

Tout d'abord, les navires, ceux surtout qui sont courts et qui tanguent beaucoup, perdent leur vitesse contre une mer debout, quelle que soit la puissance que leur machine puisse continuer à développer. Au pre-

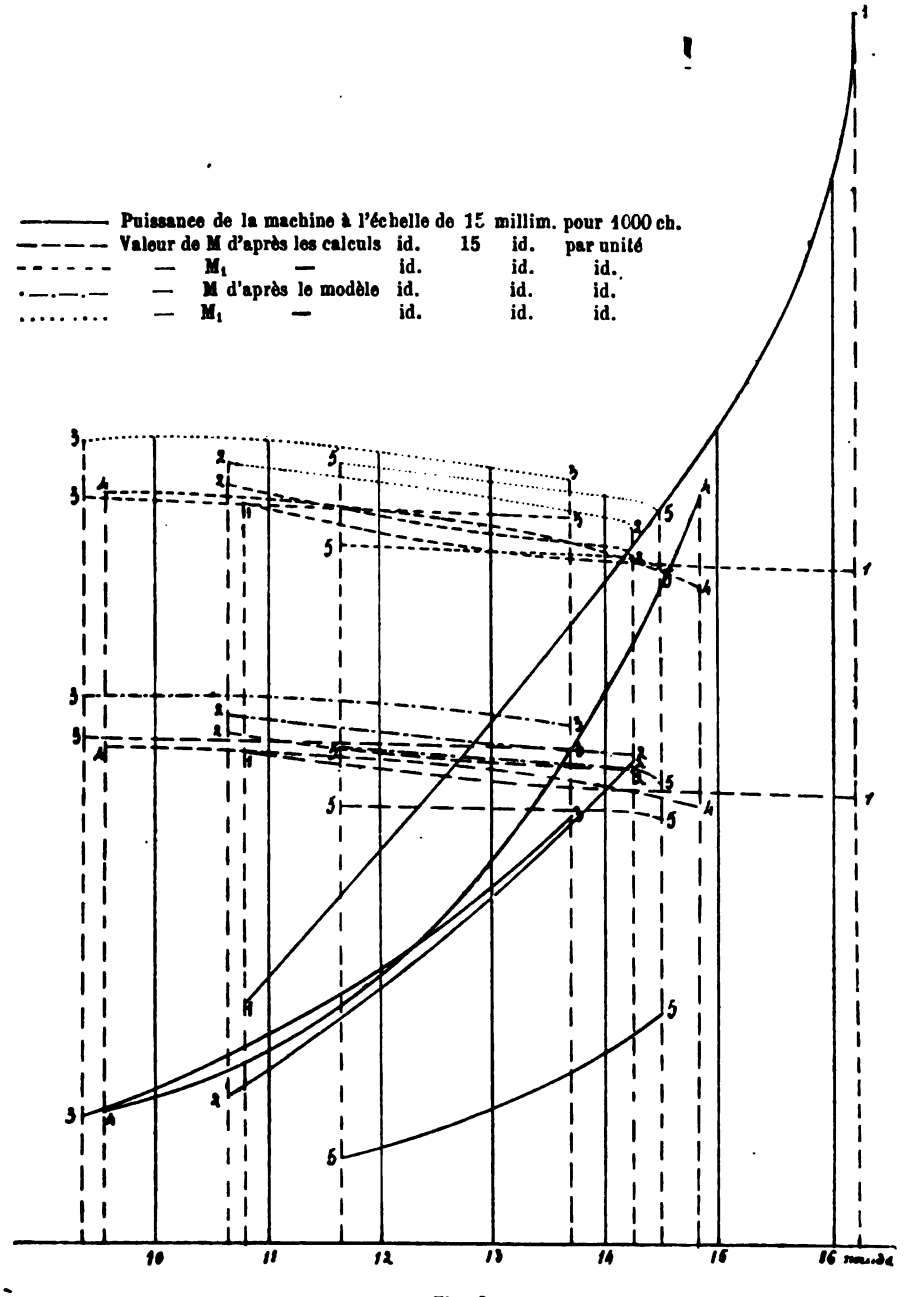


Fig. 2

(1) Magenta | (2) Turenne | (3) Océan | (4) Indomptable | (5) Rigault-de-Genouilly

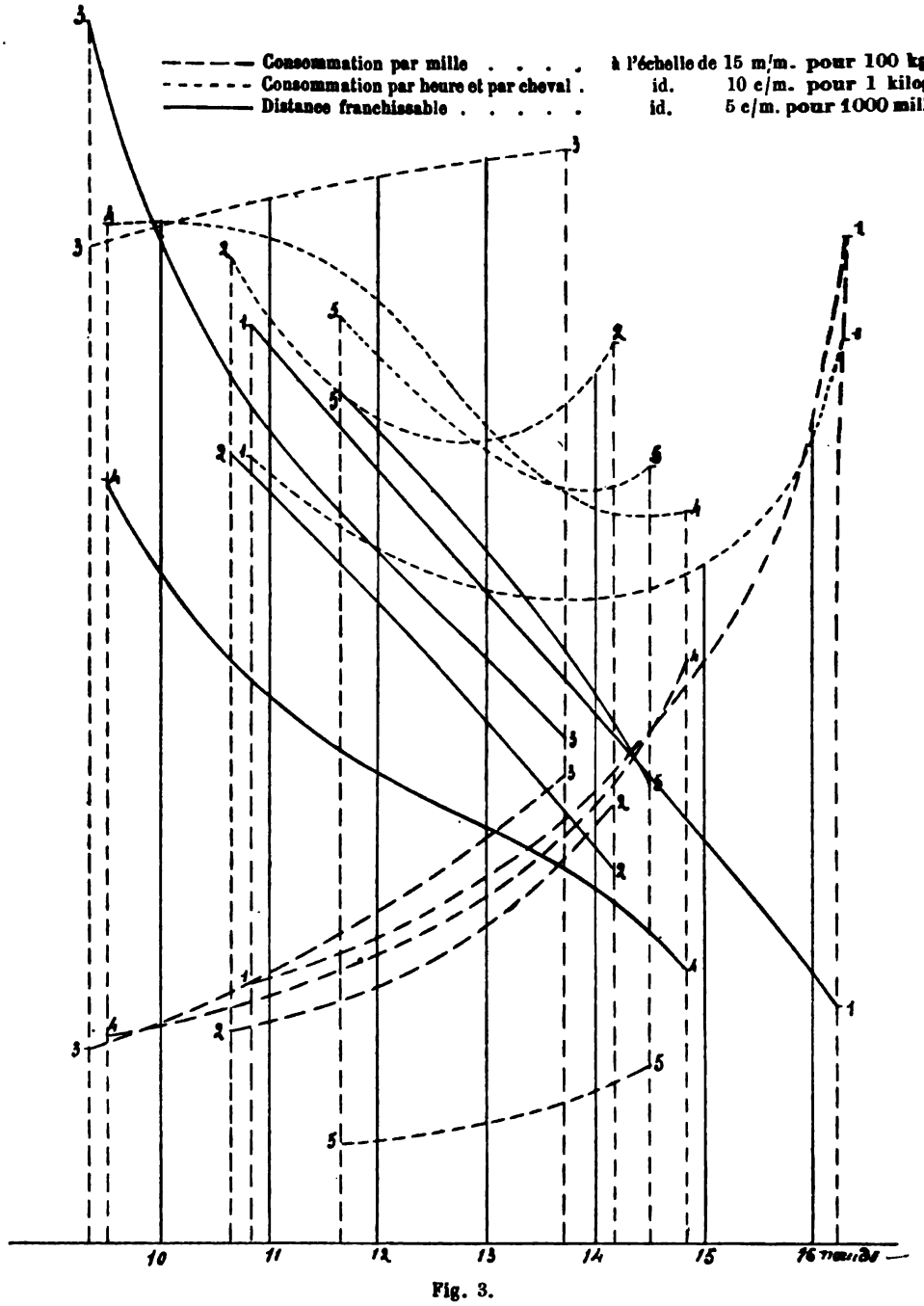


Fig. 3.

(1) Magenta | (2) Turenne | (3) Océan | (4) Indomptable | (5) Rigault-de-Genouilly

mier rang des causes de ce ralentissement, se placent les grandes variations de la résistance sur l'avant, dues à son degré variable d'immersion et d'émersion, et à l'effet de la vitesse orbitaire de l'eau à la surface des vagues, qui peut ajouter 6 ou 7 mètres à la vitesse relative sur les sommets, en les retranchant dans les creux, ou inversement. L'action retardatrice du tangage, quand le bâtiment est ras sur l'eau, comme c'est le cas des monitors, peut devenir énorme quand l'avant pénètre dans la mer qu'il soulève en bourrelet, et elle suffit à rendre impossible toute navigation à grande vitesse.

D'un autre côté, l'hélice est dans de très mauvaises conditions de rendement au moment où elle émerge; puis, en plongeant, elle entraîne une masse d'air formant dans l'eau une émulsion où elle travaille également mal. Non seulement la vitesse se trouve ainsi réduite, en supposant que la machine continue à produire son travail, mais le navire ne peut pas, de peur d'accidents, chercher à atteindre cette vitesse diminuée, et il est forcé de réduire l'allure du moteur. Les motifs obligeant à ralentir volontairement la vitesse, afin de diminuer l'amplitude du tangage, sont de deux sortes : danger des coups de mer à l'avant, et danger d'emportement de la machine; par suite, les navires ont à remplir deux conditions, pour pouvoir conserver leur vitesse par gros temps. En premier lieu, il leur faut des avants très hauts, et, comme on dit, bien défendus; très fins aussi pour ne pas soulever un trop fort bourrelet; on accepte bien d'ailleurs que l'avant embarque, à chaque coup de tangage, quelques tonnes d'eau qui trouvent facilement à s'écouler par les dalots de l'arrière. Il faut de plus, à l'arrière, un grand tirant d'eau assurant l'immersion continue de l'hélice; de ce côté, les exigences sont absolues; dès que les emballements d'hélice sont prononcés, il faut mettre aux registres de vapeur un mécanicien exercé, en attendant le régulateur automatique souvent promis. Les marins obéissent au sentiment des exigences auxquelles sont soumis l'avant et l'arrière, quand ils tendent toujours à reporter sur l'arrière les poids d'armement. Ajoutons qu'il faut surtout un grand déplacement, afin que les dimensions des vagues soient faibles par rapport à celles de la carène, et que la masse du navire, produisant un effet de volant, s'oppose aux brusques variations de vitesse.

Les très grands croiseurs, c'est-à-dire ceux de 8000 à 14000 tonneaux, ont toute la régularité de la marche des paquebots. Vers 6000 tonneaux, les effets de la mer sur la vitesse deviennent très sensibles. Il ne faut pas moins de 3000 tonneaux pour pouvoir être sûr d'accomplir, par tous les temps, à une vitesse moyenne de 12 nœuds, une mission considérée comme pressée. Au-dessous de 1500 tonneaux, un navire ne

présente plus de garanties sérieuses pour un servire d'éclaireur. Enfin, toute la longue série des avisos-torpilleurs, contre-torpilleurs ou torpilleurs de haute mer, ne peut être bien utilisée que par beau temps.

Les grands cuirassés de haute mer, en attendant qu'ils soient franchement des croiseurs cuirassés, n'ont pas actuellement les propriétés précieuses des grands croiseurs et des paquebots ; ils rencontrent assez souvent des mers sur lesquelles ils ne garderaient pas sans danger la vitesse de 12 nœuds, au-dessous de laquelle les paquebots ne tombent jamais. Les grands navires italiens, qui sont des croiseurs à beaucoup d'égards, participent à cette imperfection; ils paraissent être de simples cuirassés sous le rapport de la protection contre la mer.

Les gardes-côtes, même ceux de 8000 tonneaux, sont faits pour naviguer mal dès que la mer est grosse; il serait injuste de leur faire un reproche de ce côté. Quant aux monitors et à leurs dérivés, ils n'ont guère, quand les lames commencent à les charger, qu'à réduire leur allure au point juste nécessaire pour continuer d'obéir au gouvernail, et à attendre des conditions plus favorables de navigation.

Il serait très intéressant de connaître, pour chaque type de bâtiments de guerre, le nombre de jours par an pendant lesquels le service auquel il est destiné doit être gêné ou interrompu par l'état de la mer; mais c'est une donnée qui fait défaut. Depuis vingt-cinq ans que la théorie des ondes liquides a été faite, et son application aux vagues irréfutablement établie, l'étude pratique des vagues n'a nullement fait des progrès en rapport avec les connaissances théoriques. Il faut reconnaître cependant que les observations de la mer deviennent plus suivies et gagnent en précision; les données expérimentales s'accumulent peu à peu, et on peut espérer que les houles, comme les vents, auront un jour leur Maury.

Ce rapide exposé des principales lois de la navigation à vapeur avait sa place marquée au début d'un cours destiné à de futurs ingénieurs, qui ne possèdent guère que la connaissance de la *thermochimie* et de la *thermodynamique*, comme préparation à l'étude des machines marines. Une description sommaire des chaudières et des machines marines est plus nécessaire encore, malgré le risque de redites inévitables dans les chapitres qui suivront, avant d'entrer dans l'étude détaillée des organes et de leurs fonctions.

CHAPITRE II

DESCRIPTION SOMMAIRE DES CHAUDIÈRES

10. — *Considérations générales* — L'appareil moteur d'un navire est soumis, dans son ensemble et dans ses moindres détails, à des conditions très rigoureuses.

Le poids étant limité à une fraction bien déterminée du déplacement, la légèreté a une importance tout à fait inconnue à terre. La puissance maximum, que l'on peut obtenir avec un poids total donné, est en effet en raison inverse du poids de l'appareil par cheval, qui devient ainsi un elément primordial de la valeur du navire. De plus, l'économie du combustible n'est pas seulement à bord une économie d'argent, c'est encore, par dessus la question pécuniaire, soit le moyen d'obtenir une distance franchissable plus grande avec un approvisionnement déterminé, soit le moyen de réduire l'approvisionnement de charbon, au profit du fret rémunérateur sur les navires de commerce, au profit des qualités militaires sur les navires de guerre.

Pour les chaudières, en dehors de l'étude des détails dans lesquels rien n'est à négliger, la légèreté s'obtient par la réduction du volume d'eau contenue et surtout par l'emploi du tirage forcé, qui n'a guère de raison d'être à terre et qui tend à se répandre de plus en plus sur les navires. Le tirage forcé permet de doubler et même de quadrupler, au moins pendant un temps limité, la puissance d'une chaudière ; c'est à lui qu'est due, pour une très forte part, la grande vitesse obtenue, sur les torpilleurs d'abord, ensuite sur les grands bâtiments.

La recherche des appareils légers a conduit aussi à recourir à des pressions de plus en plus élevées ; mais ici le bénéfice de poids porte sur l'ensemble du moteur et du charbon, et non sur les chaudières en particulier dont le poids s'accroît au contraire avec la pression.

Chaudière à carneaux

Echelle de 2 cm. par mètre

Coupe verticale suivant yy.

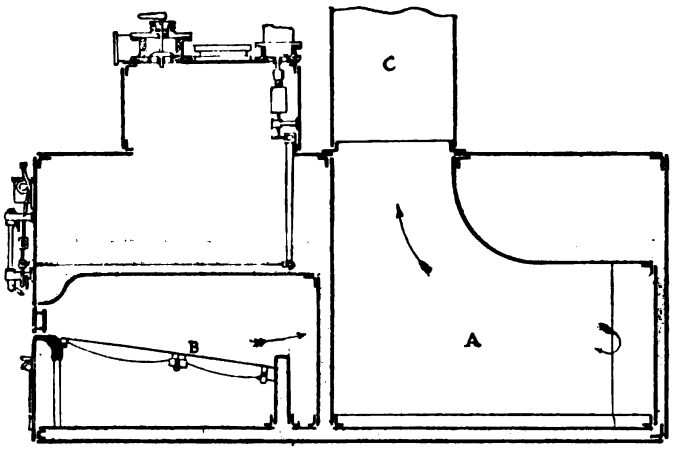


Fig. 4

Légende

A Galeries ou carneaux formant les courants de flamme.
B Grilles.
C Cheminée commune aux deux corps F, F juxtaposés, chaque corps comprenant deux compartiments boulonnés ensemble.
LL Lames d'eau.
T Trou d'homme.

Mi-élévation et mi-coupe suivant *xx*

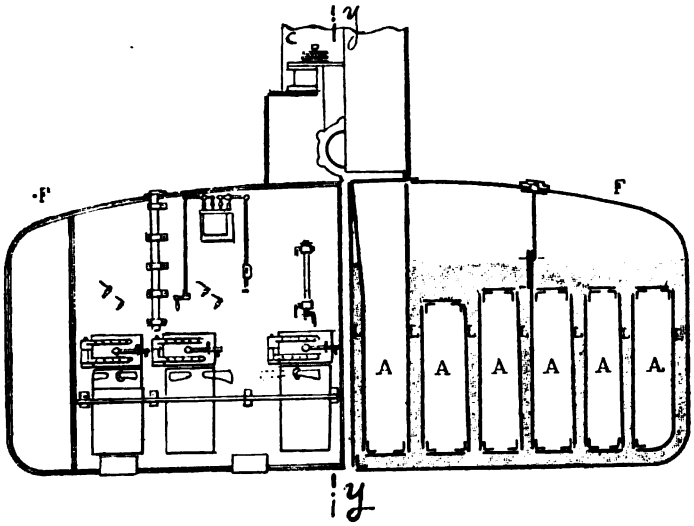


Fig. 4 *bis*

Mi-plan et mi-coupe horizontale à la hauteur des grilles.

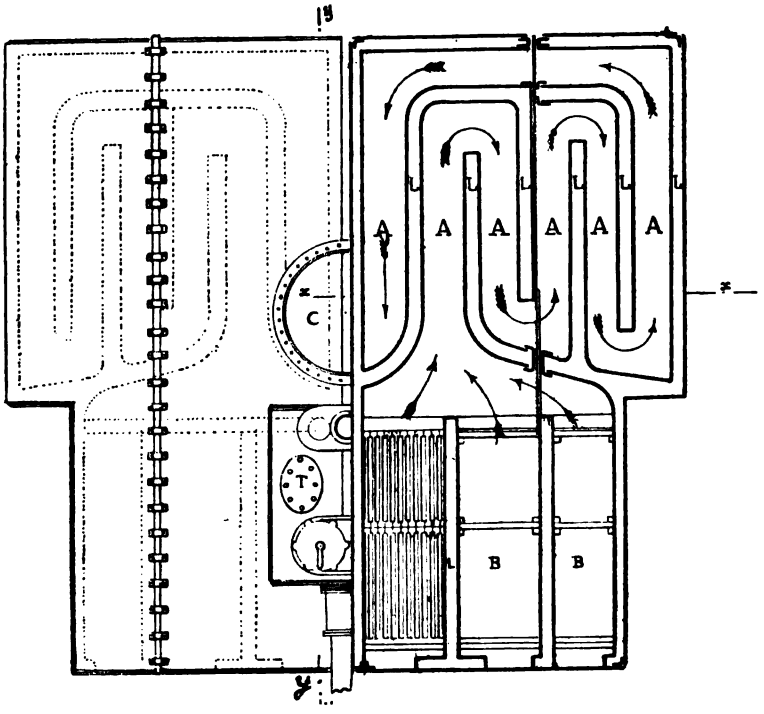


Fig. 4 *ter*

Indépendamment de la légèreté, les chaudières marines ont à satisfaire, comme encombrement, aux conditions imposées par l'espace limité dont on dispose à bord, soit en projection horizontale, soit dans le sens de la hauteur. Il faut aussi qu'elles puissent être embarquées sans exiger de panneaux de dimensions excessives. Il faut qu'elles soient durables, simples si c'est possible, capables, dans tous les cas, de faire un long service sans subir de réparations et sans exiger les visites quotidiennes auxquelles les chaudières des locomotives, par exemple, sont soumises en service. La visite, quand elle est nécessaire, doit se faire entièrement par la façade, qui est en général le seul côté accessible; la réparation, quand elle devient indispensable, doit pouvoir s'exécuter avec les seules ressources du bord.

Enfin les chaudières marines sont exposées, surtout au cours des manœuvres des navires de guerre, à des alternatives très brusques de chauffe intense et de production ralentie, qui sont une cause de fatigue redoutable et qui exigent des qualités d'élasticité particulières.

Avec tant de conditions à remplir, il n'est pas étonnant qu'on n'ait pas encore trouvé la chaudière idéale.

L'installation des chaudières à bord exige des soins particuliers, pour obtenir l'isolement des parties voisines du navire au point de vue de la chaleur, pour assurer l'arrivée abondante de l'air aux foyers, et surtout pour faciliter l'approvisionnement des grilles en charbon. Il existe enfin des détails, tels que, l'enlèvement des escarbilles, absolument futiles à terre, qui prennent sur les navires une grande importance. Mais ces questions sont du ressort de l'étude du navire lui-même ; nous nous bornerons à les indiquer.

§ 1. — Classification des chaudières.

11. — *Chaudières à carneaux.* — Pendant très longtemps, les chaudières marines ont appartenu au type dit à foyers intérieurs, qui a fourni aux chaudières terrestres de nombreux modèles, depuis la chaudière de Cornouailles, le plus ancien de tous.

Ce type, assez avantageux au point de vue de l'utilisation de la chaleur, et particulièrement recommandable pour les navires en bois à cause de la sécurité contre les dangers d'incendie, est caractérisé par la présence, sur toutes les faces, de lames d'eau qui entourent les foyers et tous les courants de flamme.

Les premiers modèles, à très faible pression, étaient de simples caisses parallélipipédiques, où les flammes circulaient dans de larges conduits à

Chaudière rectangulaire réglementaire (1858-1870)

Echelle de 2 cm. par mètre

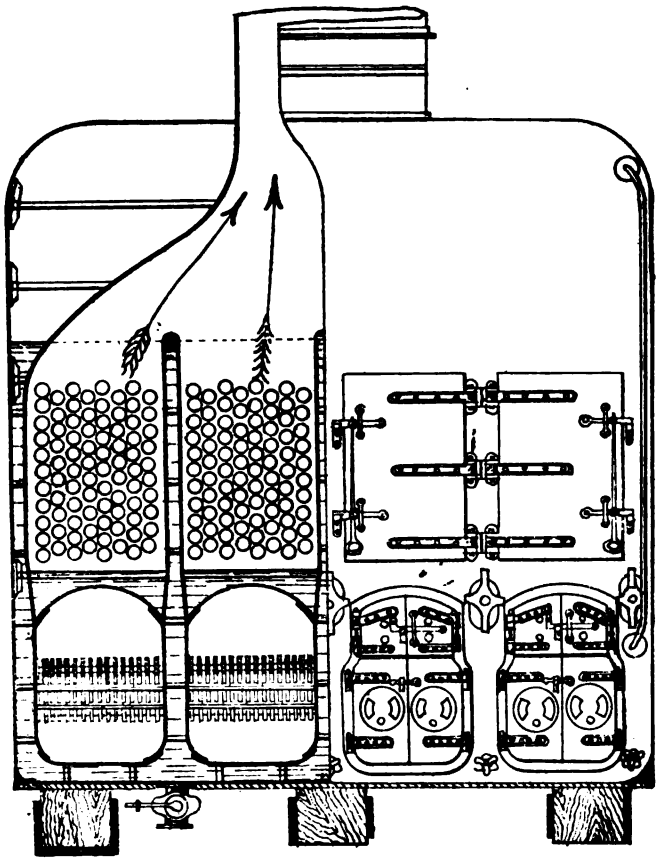


Fig. 5

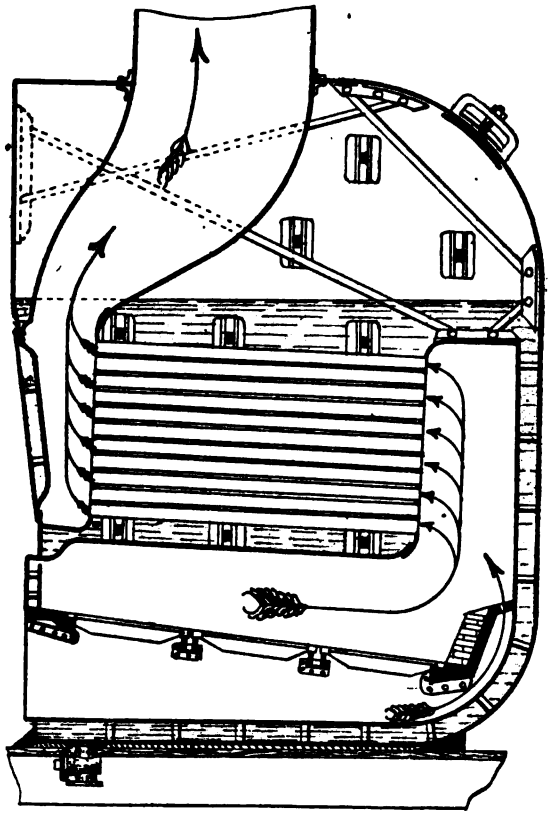


Fig. 5 *bis*

section rectangulaire appelés *carneaux*, logés dans la partie inférieure pleine d'eau, tandis que le haut de la chaudière formait le coffre de vapeur (fig. 4, 4 *bis*, 4 *ter*).

Chaudière Martin à tubes d'eau verticaux

Echelle de 1 cm. par mètre

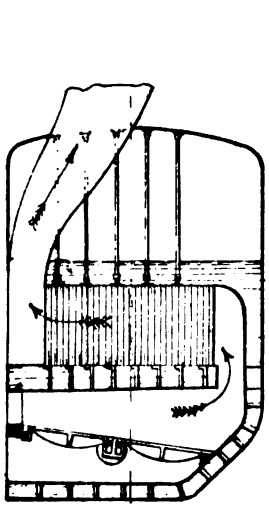


Fig. 6

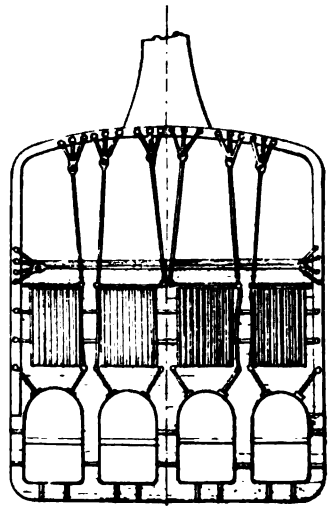


Fig. 6 *bis*

12. — *Chaudières tubulaires. — Modèle rectangulaire.* — Le premier progrès important, a consisté dans l'établissement d'un faisceau de tubes de petit diamètre divisant le courant de flamme et multipliant les surfaces de séparation, qui servent à la transmission de la chaleur entre les gaz chauds et l'eau à vaporiser.

Ces tubes ont été placés de deux manières différentes.

Le plus souvent, on substituait le faisceau de tubes à un carneau de retour de flamme ; les gaz traversaient ainsi les tubes que l'eau baignait extérieurement (fig. 5 et 5 *bis*).

Des chaudières rectangulaires de ce genre ont été longtemps réglementaires dans la marine française. Le parcours de gaz comprenait le foyer, une boite à feu ou chambre de combustion, qui pouvait être commune à plusieurs foyers, le faisceau tubulaire et une boite à fumée, d'où les gaz refroidis se rendaient à la cheminée.

Quelquefois le carneau rectangulaire de retour de flamme était conservé au-dessus du foyer ; il était alors traversé par un faisceau de tubes verticaux remplis d'eau, que la flamme léchait extérieurement (fig. 6 et 6 *bis*). Cette disposition, connue sous le nom de modèle Martin ou

Cochrane, a été adoptée sur un certain nombre de paquebots anglais et sur le cuirassé *Vanguard;* elle a eu aussi les préférences de la marine de guerre américaine; elle n'a pas été reproduite sur les chaudières cylindriques, qui ont succédé aux chaudières rectangulaires.

Toutes les chaudières, soit à tubes de flamme, soit à tubes d'eau, des deux modèles qui précèdent, ont reçu indistinctement le nom de *chaudières tubulaires*, qui peut être conservé aux chaudières à enveloppe d'eau et à foyers intérieurs, en général, sans considérer si les tubes servent de carneaux ou servent de bouilleurs.

13. — *Chaudières cylindriques.* — La forme des chaudières rectangulaires, qui s'accordait bien avec celle des chambres des chaudières à bord des navires, dut être abandonnée, lorsqu'on aborda l'étude d'appareils à plus haute pression fonctionnant à l'eau douce.

Il y eut à cette époque de nombreuses tentatives pour composer la chaudière d'un simple faisceau tubulaire avec réservoirs accessoires, le tout chauffé extérieurement; mais ces essais furent abandonnés, et l'on s'en tint à des appareils à grand volume intérieur, analogues aux précédents, de forme cylindrique, qui portent actuellement le nom de *chaudières marines*, quelquefois aussi le nom de *chaudières écossaises*, parce qu'elles sont surtout sorties, au début, des chantiers de la Clyde.

La chaudière cylindrique résiste à la pression par sa propre forme, et n'a besoin de tirants intérieurs que dans une seule direction au lieu de trois. Son inconvénient est de renfermer un volume d'eau imposé par des conditions de tracé géométrique, tandis que la chaudière rectangulaire était formée de lames d'eau dont on déterminait l'épaisseur à volonté.

Les chaudières cylindriques sont à un, deux, trois ou quatre foyers, le modèle à un foyer servant aux simples embarcations. Les modèles à trois ou quatre foyers ont des grilles à deux hauteurs différentes, au-dessus du parquet de chauffe. Les figures 7 et 7 *bis* représentent une chaudière à deux foyers, les figures 8 et 8 *bis*, une chaudière à trois foyers.

On retrouve, dans les chaudières cylindriques, toutes les parties de la chaudière rectangulaire, foyers, boîtes à feu, faisceaux de tubes et boîte à fumée. Les lames d'eau entretoisées, élément de construction principal des chaudières rectangulaires, y forment l'entourage de la boîte à feu, mais non plus celui des foyers, et elles servent souvent à établir des subdivisions intérieures dans la boîte à feu.

Les chaudières cylindriques se construisent à simple ou à double façade. Celles à double façade (fig. 9, 9 *bis*, 10, 10 *bis*) renferment jusqu'à huit foyers; elles ont été adoptées pour réaliser un bénéfice d'encom-

Chaudière cylindrique réglementaire, type haut (1875)

Echelle de 2 cm. par mètre

Mi-coupe par les boîtes à feu **Mi-coupe par les foyers**

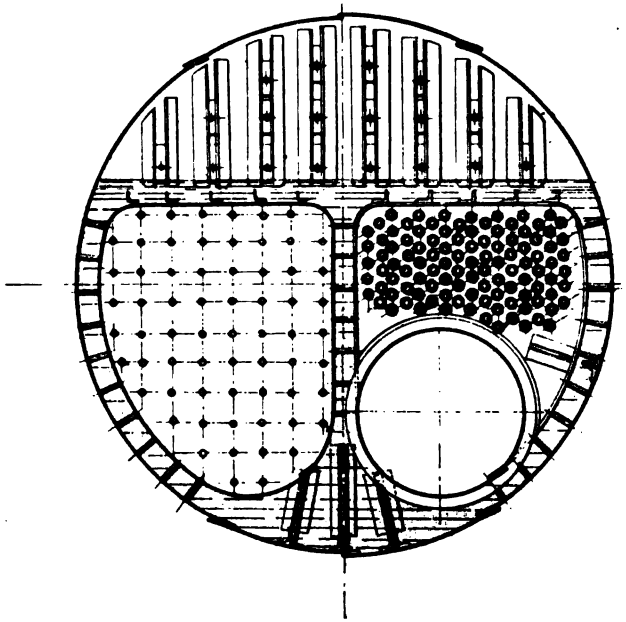


Fig. 7

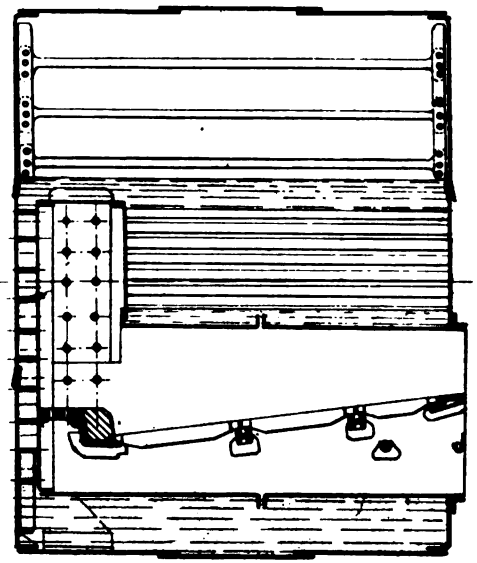


Fig. 7 *bis*

Jean-Bart

Chaudière cylindrique à retour de flamme

Echelle de 2 cm. par mètre

Mi-coupe par les foyers **Mi-coupe par les boîtes à feu**

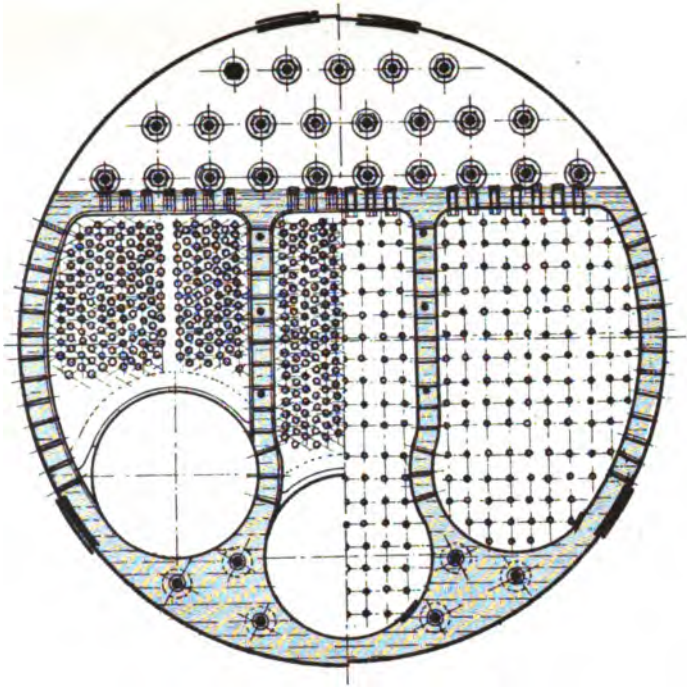


Fig. 8

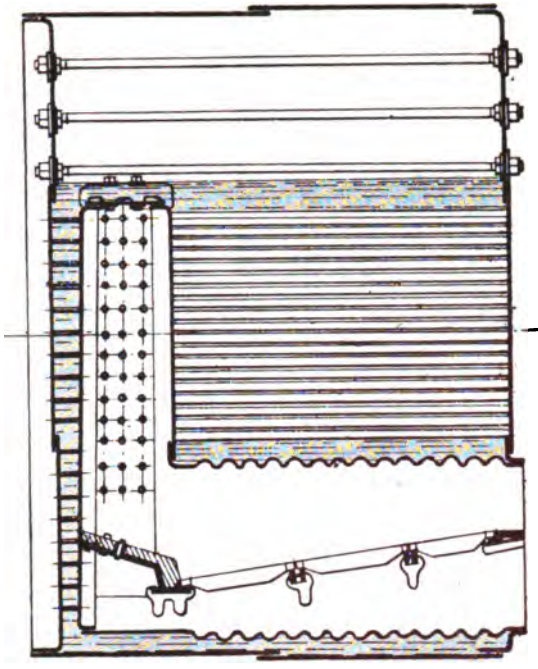


Fig. 8 *bis*

Cécille

Chaudière cylindrique à double façade.

Echelle de 15 millim. par mètre

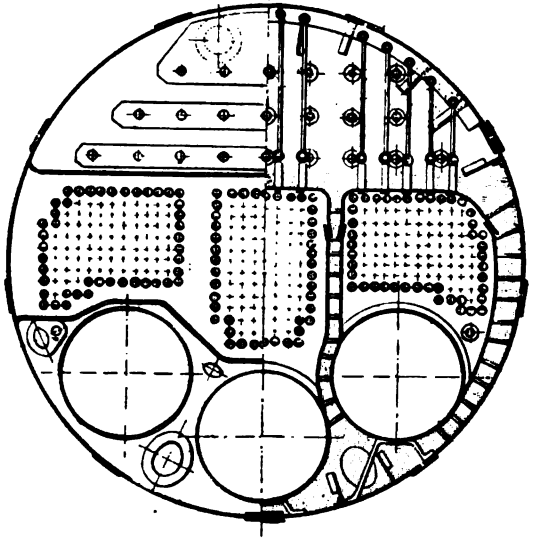


Fig. 9

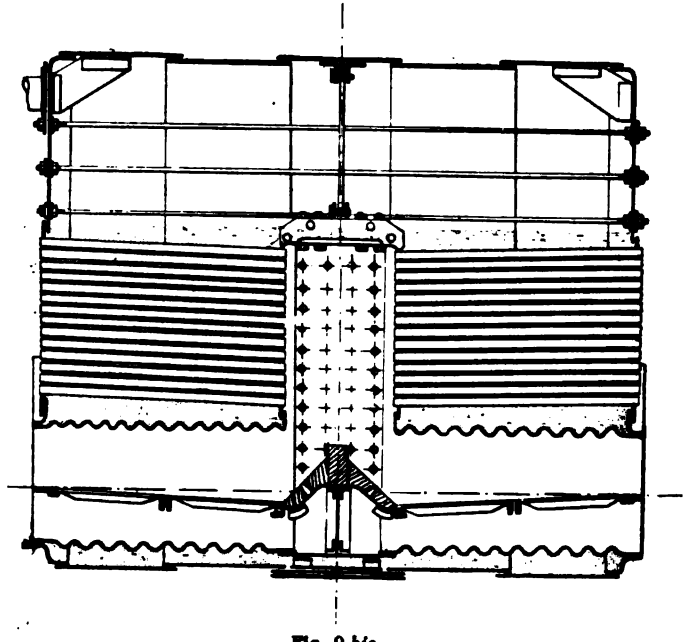


Fig. 9 *bis*

D'Entrecasteaux

Chaudière cylindrique à double façade.

Echelle de 15 millim. par mètre.

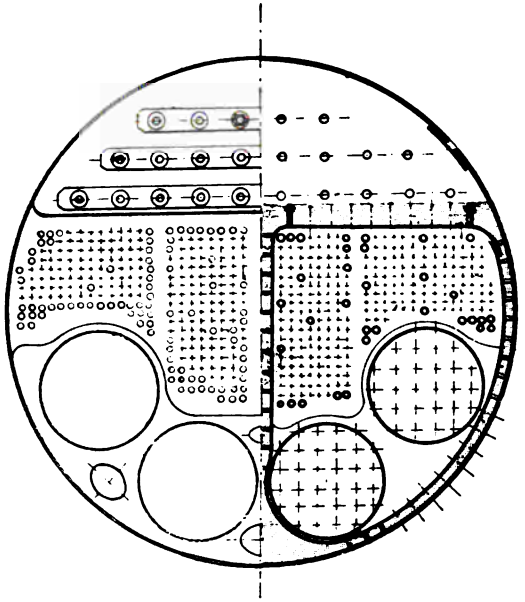


Fig. 10.

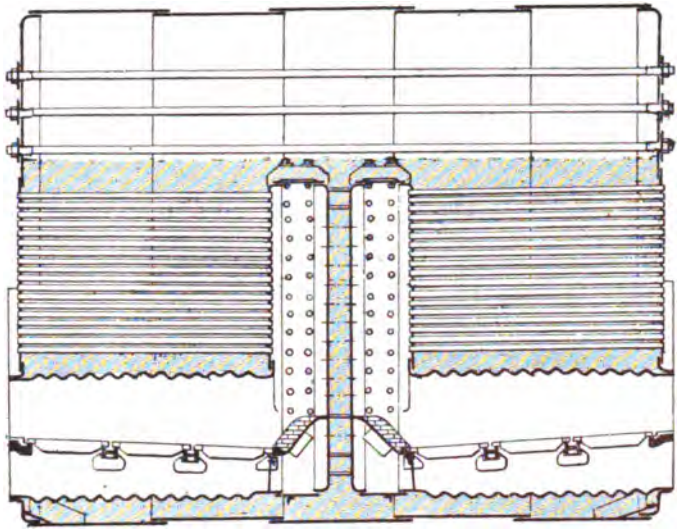


Fig. 10 *bis*

Cécille

Chaudière cylindrique à double façade.

Echelle de 15 millim. par mètre

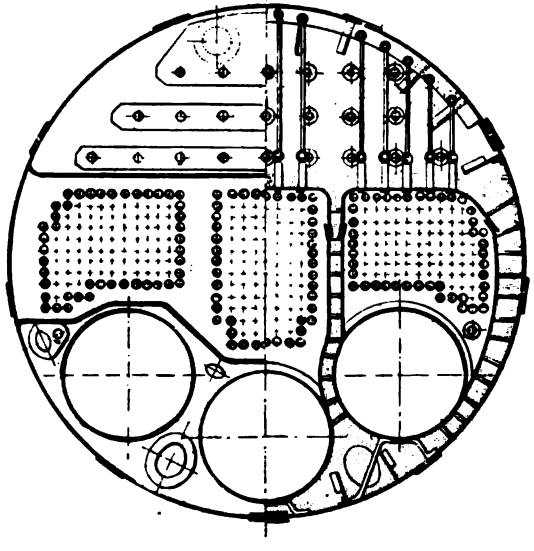


Fig. 9

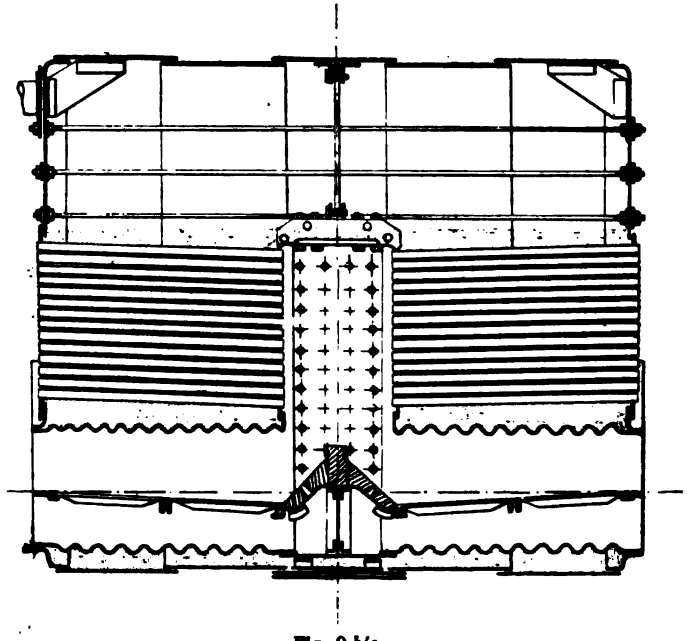


Fig. 9 *bis*

D'Entrecasteaux

Chaudière cylindrique à double façade.

Echelle de 15 millim. par mètre.

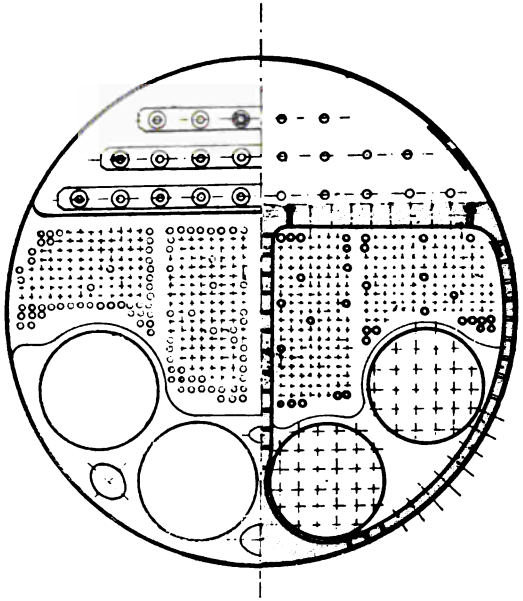


Fig. 10.

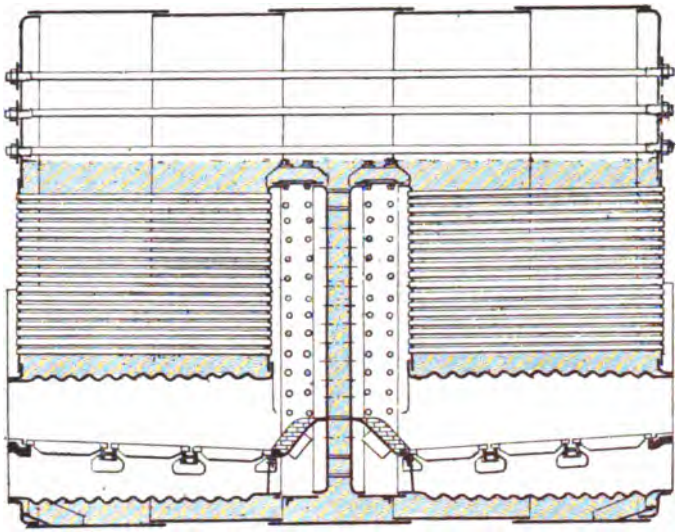


Fig. 10 *bis*

Marceau

Chaudière type Amirauté

Echelle de 15 millim. par mètre

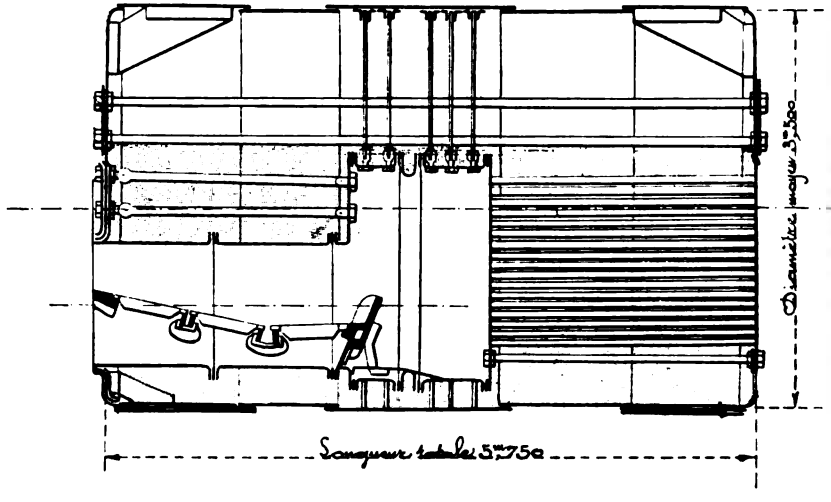


Fig. 11

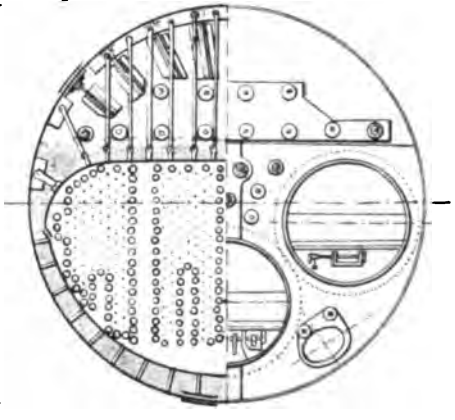


Fig. 11 *bis*

brement, et surtout de poids, à peu près comme autrefois on en réalisait un, sur les chaudières rectangulaires, quand on allongeait les corps transversalement en juxtaposant huit ou dix foyers.

Au lieu d'une section circulaire, on a quelquefois donné aux chaudières cylindriques une section dite *elliptique*, formée en réalité de deux demi-cercles et d'une partie rectangulaire; on augmentait ainsi le volume attribué aux tubes et au coffre à vapeur, sans accroître le diamètre horizontal ni le volume d'eau autour des foyers. Cette disposition, qui exigeait des tirants transversaux, a été abandonnée par suite de l'élévation des pressions.

Le modèle cylindrique à retour de flamme est le seul en usage dans la marine de commerce; mais, pour les bâtiments de guerre, le défaut de hauteur des chambres de chauffe a souvent obligé à placer les tubes dans le prolongement des foyers, de manière à diminuer le diamètre de l'enveloppe; la boîte à feu reste interposée entre les foyers et les tubes (fig. 11 et 11 *bis*). Ce modèle présente un très grand volume d'eau autour des foyers, et il exagère ainsi le défaut grave, que l'on avait cherché à atténuer sur les chaudières elliptiques.

14. — *Chaudières locomotives.* — La nécessité de diminuer le volume d'eau dans un but d'allègement, a conduit à l'introduction, dans

Chaudière pour torpilleur type B

Echelle de 15 millim. par mètre

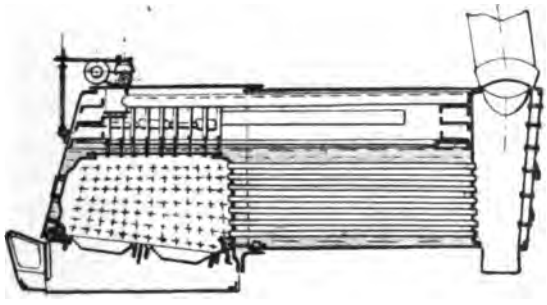


Fig. 12

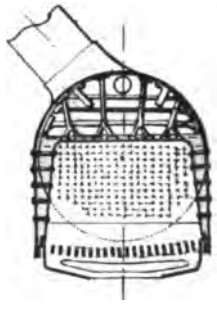


Fig. 12 *bis*

la marine, des chaudières *type locomotive*, sur lesquelles le foyer unique est entouré d'une simple lame d'eau rectangulaire, et la chambre de combustion est supprimée. Ces chaudières ont fait un bon service sur les torpilleurs, quand elles étaient conduites par un personnel très

exercé ; mais elles ne paraissent pas pouvoir supporter les marches prolongées, auxquelles sont soumises les machines marines proprement dites.

Chaudière locomotive (type Flamme)

Echelle de 15 millim. par mètre

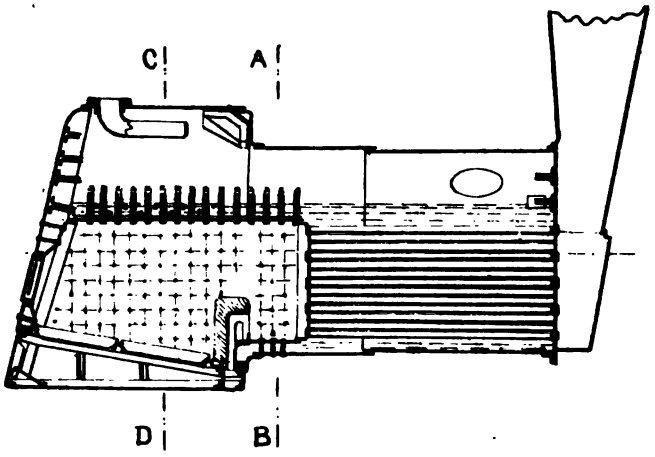


Fig. 13

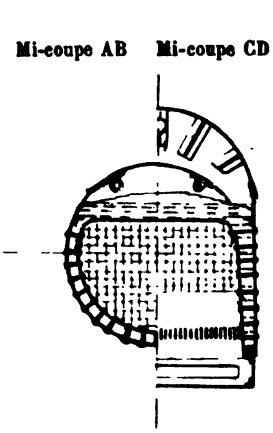


Fig. 13 *bis*

15. — *Chaudières tubuleuses.* — La poursuite de pressions de plus en plus élevées, et surtout, pour la marine de guerre, la nécessité toujours plus pressante d'alléger les appareils, a conduit, dans ces dernières années, à une vive reprise des études de chaudières simplement composées de tubes pleins d'eau et de vapeur. Ces études n'avaient, à vrai dire, jamais été abandonnées, même pour les chaudières à terre. Actuellement, les chaudières composées de tubes, ou *chaudières tubuleuses*, tendent à détrôner la chaudière locomotive sur les torpilleurs. Elles commencent à être d'un usage courant sur les croiseurs rapides. La marine française en a fait l'application à des cuirassés. Enfin, les *Messageries maritimes* ont adopté, sur leurs paquebots, le modèle le plus ancien et le mieux éprouvé.

Les chaudières tubuleuses présentent tant de formes variées, et parfois capricieuses, qu'il n'est guère possible d'en donner une description générale, comme celle des chaudières cylindriques. Dans l'étude détaillée, nous les diviserons, au point de vue du fonctionnement, en trois séries distinctes :

1° Chaudières a circulation limitée, ou chaudières à serpentins,

Milan

Chaudière Belleville

Echelle de 15 millim. par mètre

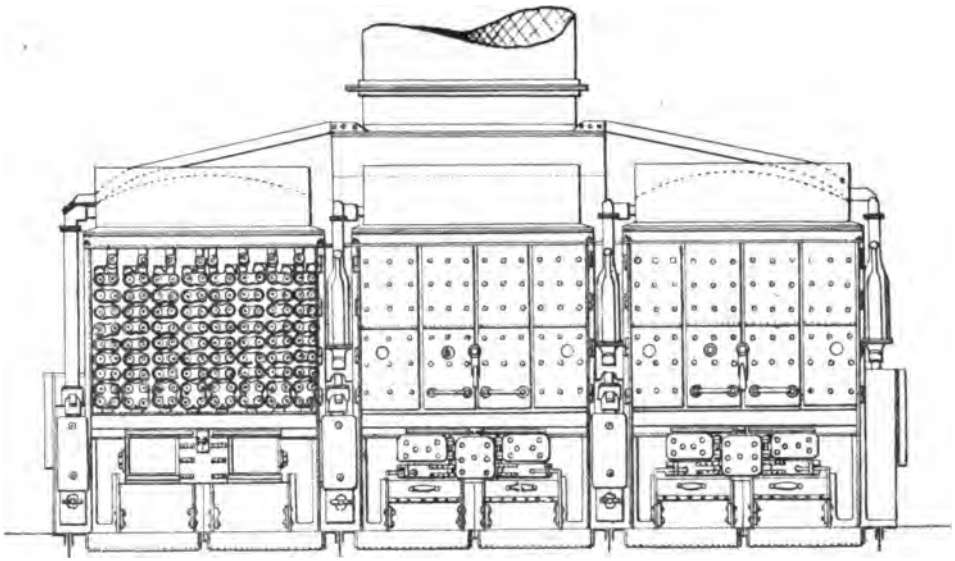


Fig. 14

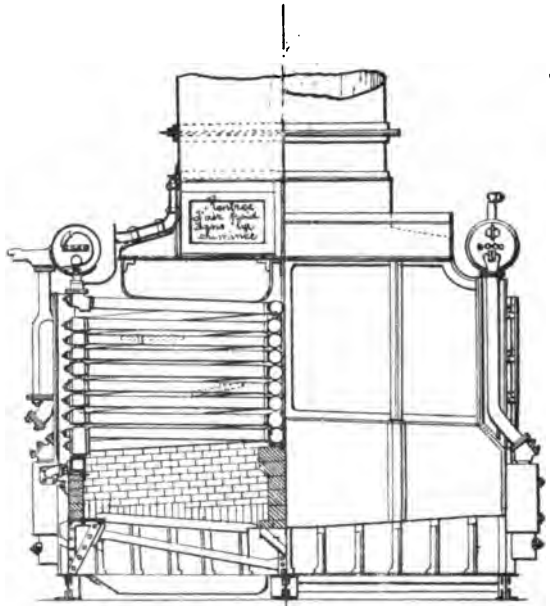


Fig. 14 *bis*

Jauréguiberry

Ensemble d'un groupe de deux chaudières. (Système Lagrafel et D'Allest)

Echelle de 13 millim. par mètre.

Vue de face — Coupe transversale

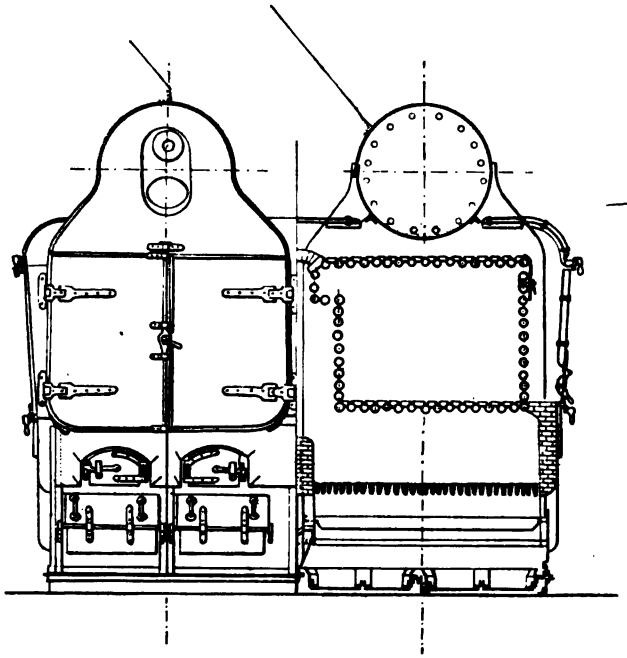


Fig. 15

Coupe longitudinale

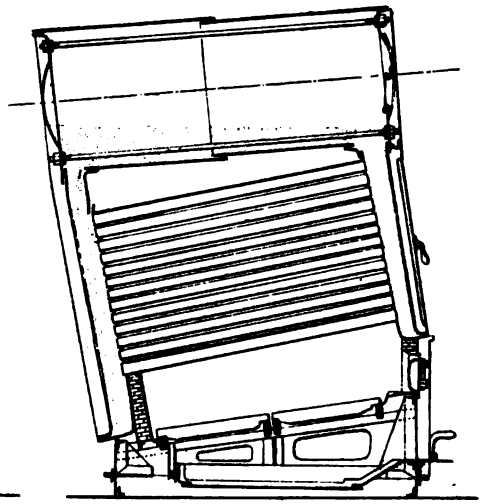


Fig. 15 *bis*

dans lesquelles il n'y a pas d'autre mouvement de l'eau que celui nécessaire pour remplacer l'eau vaporisée (fig. 14 et 14 *bis*).

Le faisceau de tubes bouilleurs, disposé plus ou moins en serpentins, et parfois composé simplement d'un tube unique enroulé en hélice autour du foyer, reçoit l'eau d'alimentation à l'une de ses extrémités et décharge la vapeur à l'autre.

Les chaudières Belleville sont le modèle le plus répandu.

2° CHAUDIÈRES A CIRCULATION LIBRE, ou chaudières à lames de tête, caractérisées par l'existence de deux réservoirs verticaux régnant sur toute la hauteur de la chaudière, réunis entre eux par le faisceau de tubes, qui est horizontal ou peu incliné (fig. 15 et 15 *bis*).

Les tubes prennent l'eau dans un des réservoirs et déchargent la vapeur dans l'autre; le courant est en général beaucoup plus actif que dans le cas précédent; la vapeur se dégage, dans tous les cas, beaucoup plus vite. Tels sont les modèles Oriolle, D'Allest, Niclausse, pour ne citer que les plus répandus en France.

3° CHAUDIÈRES A CIRCULATION ACCÉLÉRÉE, ou chaudières à réservoirs horizontaux placés à des niveaux différents.

Ce genre de chaudière est caractérisé par la direction, aussi voisine

Torpilleurs N^os^ 172 à 176

Chaudière système Du Temple

Echelle de 15 millim. par mètre

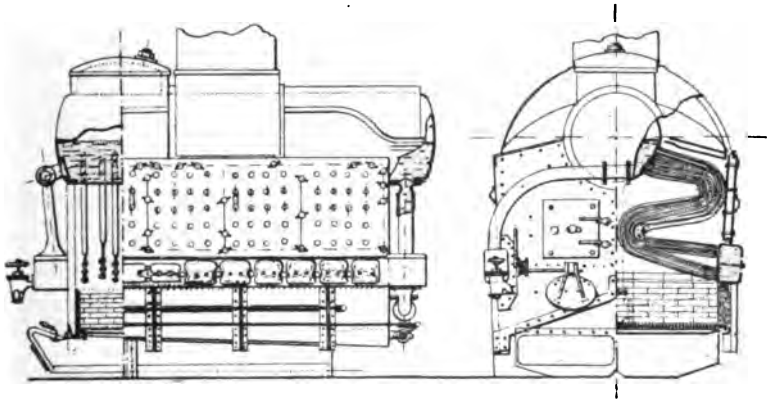


Fig. 16 Fig. 16 *bis*

que possible de la verticale, donnée au mouvement de bas en haut, de l'eau chauffée, sur son parcours entre les réservoirs d'eau et de vapeur; de gros tuyaux de retour ramènent l'eau non vaporisée, des réservoirs

de vapeur aux réservoirs d'eau (fig. 16 et 16 *bis*). Tout est ainsi dispose pour favoriser un mouvement de circulation continu et général de la masse liquide.

Le type est la chaudière Du Temple, d'où sont dérivées les chaudières Thornycroft, Normand, etc., etc.

Cette distinction des chaudières tubuleuses en trois types n'est pas absolue, en ce sens qu'il existe quelques modèles intermédiaires difficiles à classer; mais elle constitue bien une classification naturelle, à la fois au point de vue des dispositions générales, du mode de fonctionnement, et des principales qualités de chacun des trois types.

Les chaudières des deux premiers types se répandent en ce moment pour le service des machines terrestres, où elles font concurrence aux anciens modèles cylindriques généralement à bouilleurs ou à carneaux; elles se recommandent par une grande atténuation des dangers d'explosion; on s'accorde aussi à leur reconnaître un bon fonctionnement économique, aux chauffes très modérées qui sont en usage à terre.

Les chaudières tubuleuses du troisième type répondent plus spécialement à des besoins spéciaux à la marine de guerre.

§ 2. — Indications générales sur le fonctionnement des chaudières.

16. — *Accessoires de chaudières. Services principaux à assurer.* — La chaudière est toujours en principe un appareil simple, bien que sa construction soit délicate et que son bon fonctionnement exige des soins minutieux. En dehors de ses deux parties constitutives, un réservoir de flamme et un réservoir d'eau juxtaposés, il est difficile d'y découvrir des organes bien distincts.

Le réservoir de flamme commence aux foyers, qui se composent de deux parties, le *fourneau* et le *cendrier*, séparés par la *grille*; il se continue par une *boîte à feu*, ou chambre de combustion, parfois difficile à séparer des conduits de flamme qui lui font suite ; il se termine à la *boîte à fumée*.

Le réservoir d'eau et de vapeur, qui est la chaudière proprement dite, remplit toujours le même office, quelle que soit sa forme; il présente quelquefois, à la partie inférieure, un appendice appelé *déjecteur*, où s'amassent les dépôts solides en suspension dans l'eau, et souvent, à la partie supérieure, un coffre à vapeur isolé, qui permet d'élever la prise de vapeur au-dessus du niveau de l'eau.

Comme consolidations intérieures, on a des *entretoises* dans toutes les lames d'eau, des *tirants* dans les grands réservoirs d'eau et de vapeur, quand la forme de ceux-ci l'exige.

Les réservoirs de flamme, d'eau ou de vapeur, reçoivent les portes et les trous de visite nécessaires pour le ramonage, les visites intérieures et le nettoyage ; les ouvertures dans la chaudière sont fermées par des *autoclaves*.

Les accessoires des chaudières sont assez nombreux et parfois compliqués ; ils ont à remplir des offices très variés.

Les boîtes à fumée se relient par les conduits de fumée, à la culotte de cheminée.

La *cheminée* sert à l'évacuation des produits de la combustion, et produit par son tirage l'appel d'air au foyer ; le tirage des cheminées est, comme on sait, un moyen très simple, mais très coûteux sous le rapport des calories dépensées, d'imprimer un mouvement à une colonne gazeuse. La cheminée est entourée d'enveloppes isolantes ; elle était, tantôt à télescope, tontôt à rabattement, au temps de la marine à voiles, mais ce n'est plus là qu'un souvenir historique.

Les accessoires concernant le fonctionnement des chaudières comprennent en premier lieu ce qui est relatif à l'alimentation.

En général, pour parer aux accidents, il y a deux systèmes complets d'alimentation distincts ; la plupart des appareils en service ont des pompes d'alimentation dans la chambre des machines, et des petits chevaux dans la chambre de chauffe ; chaque système a son tuyautage propre, et doit suffire à lui seul. Les pompes alimentaires sont destinées à la marche normale et sont manœuvrées par les mécaniciens ; les petits chevaux constituent une garantie placée sous la main des chauffeurs. Il est d'usage assez fréquent aujourd'hui de mettre toutes les pompes alimentaires dans les chaufferies.

Le système d'alimentation comprend tous les appareils destinés à la purification de l'eau, et ceux destinés à son réchauffage, lesquels prennent une importance croissante. Généralement aussi, il y a une injection d'eau de chaux.

Puis il faut ajouter les accessoires servant au contraire à la vidange des chaudières et aux extractions destinées à l'enlèvement des eaux les plus impures.

Un accessoire très important, dans les appareils évaporatoires des navires de guerre, resté peu appliqué jusqu'ici dans la marine de commerce, consiste dans les appareils mécaniques produisant artificiellement le mouvement de l'air, et substituant, au tirage naturel par la cheminée, un tirage plus puissant et réglable à volonte.

Dans certains cas, on profite du tirage artificiel pour refroidir les gaz de la combustion au-dessous de ce que le tirage naturel exige, et pour augmenter ainsi le rendement de la chaudière; c'est sous cette forme surtout que le tirage forcé tend à se répandre sur les paquebots.

Les accessoires du tirage forcé consistent en ventilateurs et quelquefois en machines soufflantes à pistons.

Après les accessoires destinés à fournir l'eau et l'air, il semblerait devoir y avoir place pour ceux destinés à fournir le combustible; mais toutes les dispositions essayées pour charger automatiquement les fourneaux ont été abandonnées. L'alimentation mécanique en combustible paraît être subordonnée actuellement à l'emploi de l'huile minérale.

Certaines chaudières exigent des appareils de brassage de l'eau, dont les plus efficaces sont des turbines appelées *barboteuses*.

A ces accessoires destinés au fonctionnement, s'en ajoutent d'autres destinés à la sécurité; ce sont les *manonètres*, *soupapes de sûreté*, *soupapes avertisseuses*, *niveaux-d'eau*, *robinets de niveau*. Les flotteurs d'alarme ne sont pas employés dans la marine, mais il existe des régulateurs d'alimentation automatiques, conduits par un flotteur, qui sont de véritables appareils de sécurité. Les rondelles fusibles méritent à peine une mention, leur application aux chaudières marines étant extrêmement rare.

Il y a enfin les prises de vapeur, avec tout le tuyautage qui y fait suite et qui peut être considéré comme un accessoire, soit des chaudières, soit des machines.

Chaque chaudière a sa soupape d'arrêt permettant de l'isoler; puis, sur le tuyautage, sont disposés en divers points des robinets-vannes, appareils de fermeture très étanches, séparant les divers trajets que l'on peut faire suivre à la vapeur en cas d'avarie sur certains points, jusqu'à l'arrivée au cylindre, où le mécanicien règle sa dépense de vapeur à l'aide du registre final.

Le tuyautage de vapeur, avec tout ce qu'il comporte ainsi, de vannes, d'appareils de sécurité, de joints glissants et de tirants pour parer aux effets de la dilatation, de purgeurs et de tubulures, forme aujourd'hui un accessoire d'autant plus complexe, que l'on a tenu à doter les divers services du bord, de réseaux de tuyaux distincts, ayant, sur les chaudières communes, des prises de vapeur spéciales. La complication à laquelle on a été ainsi amené, en accumulant sur les navires de guerre les précautions de tout genre, a été poussée assez loin pour être elle-même une source de dangers; elle crée un contraste frappant, entre la marine de guerre et celle de commerce, sur le seul point où les exigences du service soient à peu près les mêmes.

CHAPITRE III

DESCRIPTION SOMMAIRE DES MACHINES MARINES

§ 1. — Indications générales.

17. — *Du fonctionnement des machines marines.* — Les machines marines, de même que les chaudières, sont soumises à des conditions de légèreté inconnues des machines terrestres.

Les conditions d'économie de vapeur sont aussi, pour elles, beaucoup plus importantes que pour les machines fixes, parce que, du poids de vapeur dépensé par la machine, dépend le poids des chaudières et celui du charbon consommé.

Pour atteindre la légéreté voulue, on emploie des matériaux de choix et, surtout, on fait tourner les appareils au plus grand nombre de tours possible, la vitesse de rotation étant, dans les facteurs du travail, celui qui ne pèse rien.

La vitesse du piston pour les machines, et l'intensité du tirage pour les chaudières, sont les grands moyens d'allégement des appareils marins.

Pour obtenir l'économie de vapeur, on adopte les hautes pressions, les longues détentes, et surtout le système des détentes successives. Toutes les machines marines font circuler la vapeur en série, dans deux, trois, ou même quatre cylindres successifs.

L'emploi des détentes successives, avec un grand volume de cylindre final, conduit bien à une certaine augmentation du poids des machines, de même que celui des hautes pressions, à une augmentation du poids des chaudières; mais, en fin de compte, il y a économie sur l'ensemble des trois poids, des machines, des chaudières et du charbon.

Les machines marines sont toujours à condensation, l'eau ne man-

quant jamais pour le fonctionnement des condenseurs. C'est là, au point de vue de l'économie, une condition favorable qu'il n'est pas toujours possible de réaliser à terre dans les machines fixes, et que les locomotives et les locomobiles ne connaissent pas.

Au point de vue de la rapidité et de la sûreté des manœuvres, changements d'allure, stoppages, renversements de marche, les machines marines doivent satisfaire à des exigences particulières, qui sont surtout rigoureuses sur les navires de combat. L'appareil de mise en train a une très grande importance ; il est généralement mû par une petite machine à vapeur spéciale. L'emploi de plusieurs cylindres est indispensable pour assurer le départ dans un sens ou l'autre à volonté, dans toutes les positions de l'arbre, et il est nécessaire, d'ailleurs, à la régularité de la rotation ; même au temps des machines à simple détente, il y avait toujours deux cylindres au moins, recevant la vapeur en dérivation et présentant leurs manivelles à angle droit ; à peine trouverait-on sur quelques cargos des exemples de machines à un cylindre. Il n'y a jamais de volant.

Les machines marines, ainsi disposées à plusieurs cylindres et sans volant, obéissent immédiatement à la commande des tiroirs ; elles ne connaissent pas la marche à contre-vapeur des locomotives, parce que les hélices elles-mêmes obéissent immédiatement à la machine et travaillent à contre du mouvement relatif de l'eau.

La disposition générale des machines marines est surtout déterminée par la question d'encombrement.

Nous parlerons seulement des machines à hélices. Les machines à roues ont été décrites suffisamment dans les anciens ouvrages, auxquels il n'y a pas de chapitre nouveau à ajouter à leur sujet, parce qu'elles se font de plus en plus rares. Les machines à roues sont toujours très encombrantes à cause de la lenteur d'allure imposée par le propulseur. Les hélices, au contraire, laissent une très grande marge pour la détermination du nombre de tours, et peuvent en général suivre la vitesse rotative des machines, quelle qu'elle soit, sans grand inconvénient au point de vue de leur rendement. On accepte d'ailleurs une légère diminution du rendement des hélices, lorsque l'emplacement disponible impose une limite aux dimensions de la machine et oblige, par suite, à dépasser le nombre de tours qui serait le plus avantageux pour le propulseur.

Sur les navires munis de machines à faible puissance, la nécessité de donner aux hélices un grand diamètre oblige parfois aujourd'hui à réduire le nombre de tours au-dessous de ce que permettrait le bon fonctionnement des machines. Au début, c'était les machines, au contraire, qu'il était impossible de faire tourner aussi vite que les propul-

seurs l'exigeaient; on était alors obligé d'interposer un engrenage multiplicateur.

§ 2. — Classification des machines.

18. — *Machines verticales.* — *Modèle à pilon.* — Les machines sont horizontales ou verticales.

Carnot

Machine B^{d} — Coupe par l'axe du petit cylindre

Echelle de 2 cm. par mètre

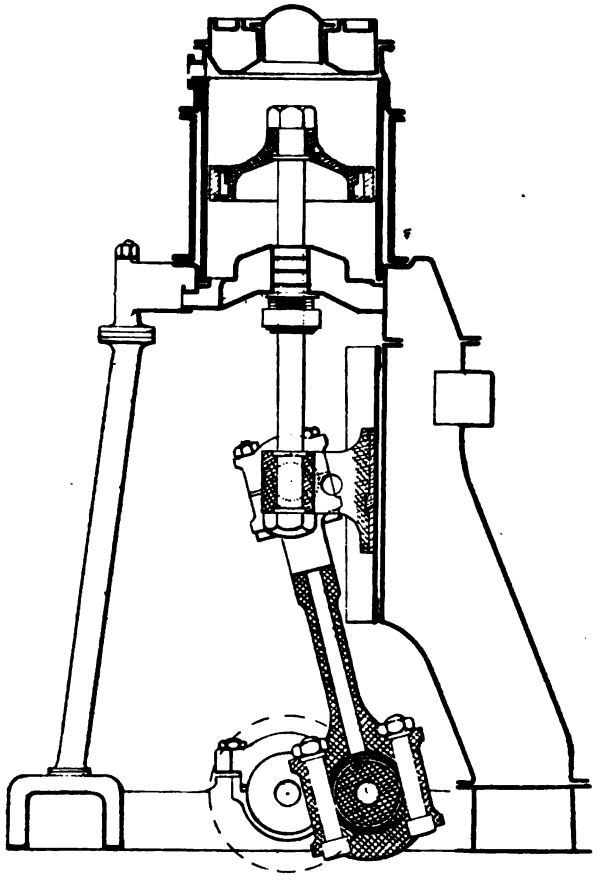


Fig. 17

Les machines verticales ont les cylindres au-dessus de l'arbre, et se présentent ainsi tout en hauteur, direction dans laquelle l'espace ne

manque jamais, du moins sur les paquebots et les cargos. C'est là ce qui les fait universellement adopter dans la marine du commerce.

Les machines verticales, ou, comme on les nomme souvent, les *machines à pilon*, présentent de plus, au point de vue du fonctionnement, et surtout de la surveillance, quelques avantages, qui les font préférer maintenant pour les navires de guerre, toutes les fois que leur installation est possible.

Les machines verticales sont toutes du même système, à bielles directes, avec de simples différences de modèle, qui portent surtout sur la nature des bâtis reliant les cylindres à la plaque de fondation.

Hirondelle

Machine à pilon transformée en tandem

Echelle de 2 cm. par mètre

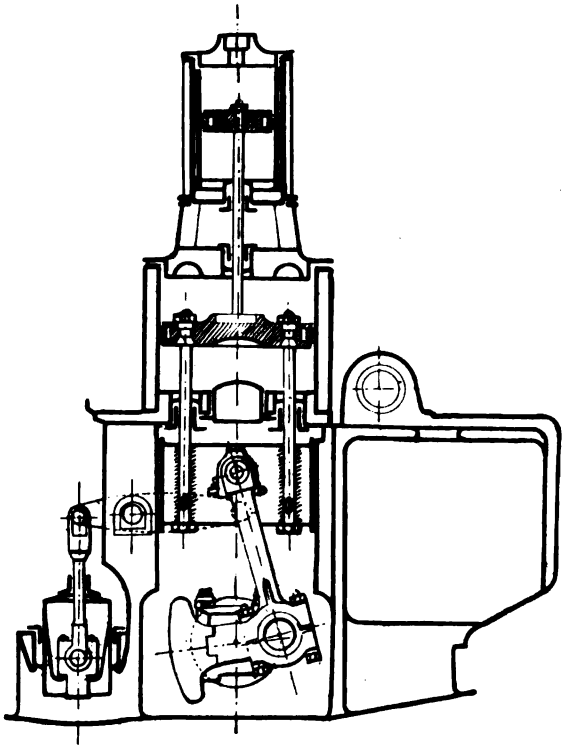


Fig. 18

Très souvent, dans la marine de commerce surtout, les machines sont montées en *tandem*, c'est-à-dire avec deux cylindres l'un au-dessus de

l'autre, et une seule tige pour les deux pistons. On diminue ainsi l'encombrement dans le sens horizontal, et aussi le nombre des organes à surveiller, à graisser et à entretenir. On peut, en effet, sur un arbre à deux coudes, monter en tandem une machine à triple ou à quadruple détente.

Sur les bâtiments de guerre, on est limité, dans le sens de la hauteur, par la nécessité de tenir le moteur à l'abri des projectiles. Autrefois, il était de règle absolue de rester toujours au-dessous de la flottaison. On se contente aujourd'hui de loger la machine toute entière au-dessous d'un pont protecteur, même quand celui-ci n'assure pas une protection complète. La diminution dans les dimensions des cylindres, qui résulte de l'adoption des hautes pressions, des allures rapides, et surtout de l'emploi des propulseurs et des machines multiples, permet de loger presque toujours des machines verticales dans la hauteur dont on dispose au-dessus de l'arbre.

La préférence en faveur des machines verticales a été assez prononcée pour faire réduire quelquefois la course des pistons d'une manière exagérée.

19. — *Machines horizontales. Modèles à bielle directe, à bielle renversée, à fourreau.* — Les machines des navires de guerre étaient autrefois horizontales; elles présentaient alors, dans leurs organes mobiles, l'une des trois dispositions suivantes :

Milan

Machine à bielles directes

Coupe longitudinale suivant l'axe d'un cylindre B.P.

Echelle de 3 cm. par mètre

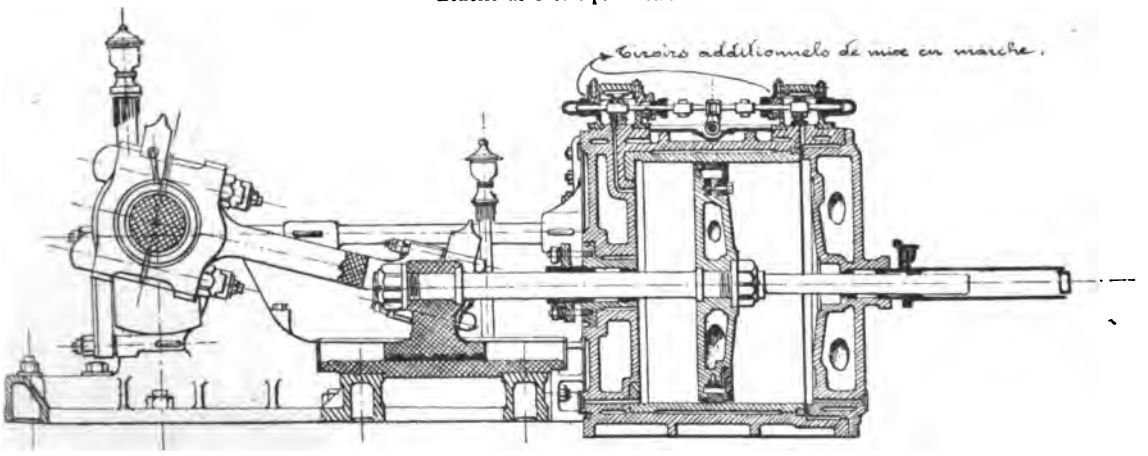


Fig. 19

Redoutable

Machine à bielles renversées

Coupe suivant l'axe longitudinale du groupe du cylindre A

Echelle de 2 cm. par mètre

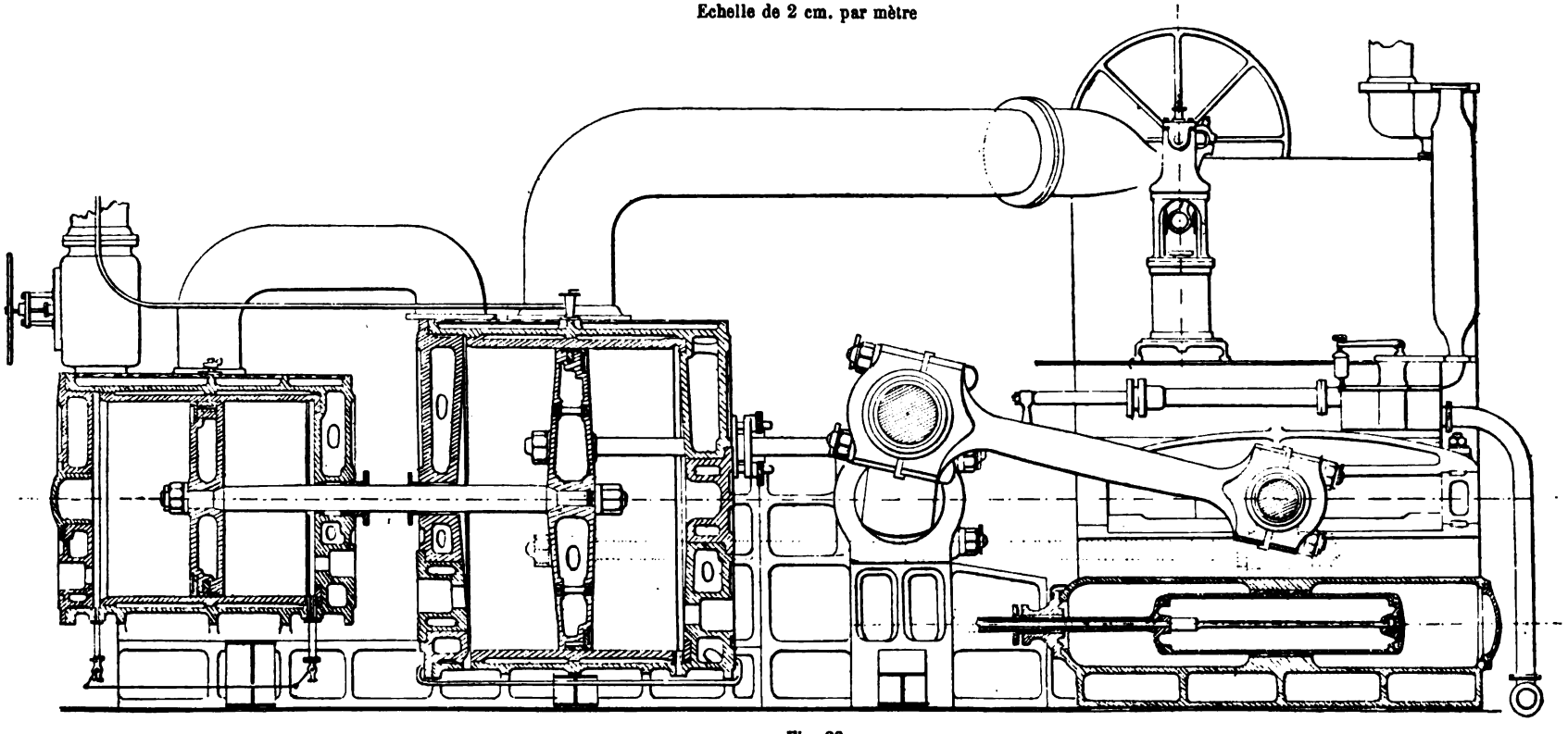


Fig. 20

Intrépide

Machine à fourreaux

Echelle de 15 millim. par mètre.

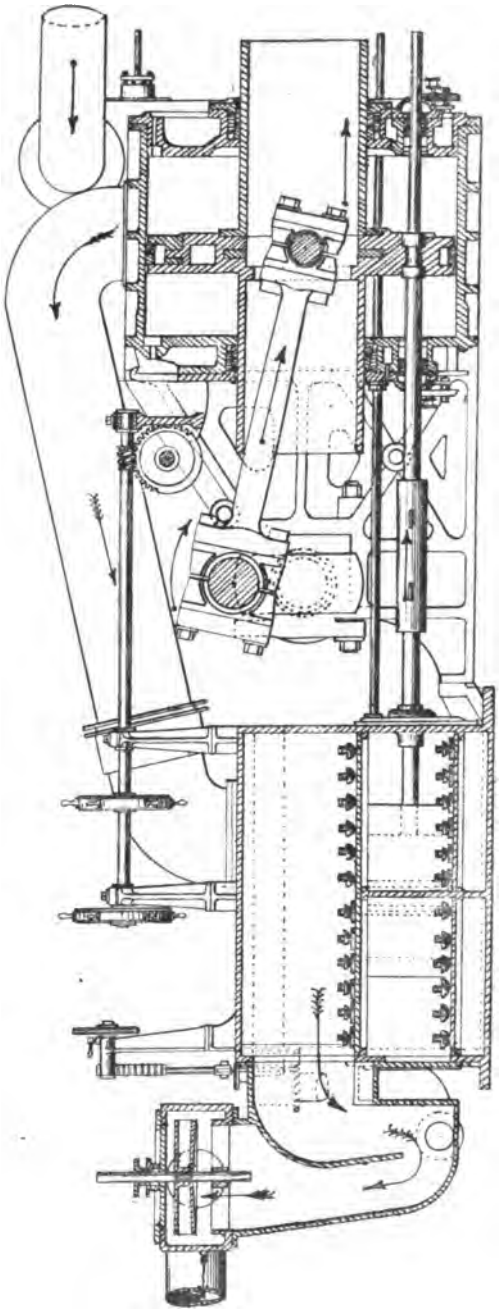


Fig. 21

1° Machines a bielles directes, (fig. 19), présentant la disposition habituelle des machines à vapeur.

Cette disposition très simple n'était presque jamais applicable sur un arbre d'hélice unique, placé dans l'axe du navire; la demi-largeur des navires était, en effet, insuffisante pour la longueur réunie d'une manivelle, d'une bielle, d'un cylindre.

On trouve au contraire cette disposition sur les navires à deux hélices, tels que le *Milan*, le *Davout*, le *Suchet*, etc.

2° Machines a bielles renversées, (fig. 20), ayant les glissières et le pied de bielle du côté de l'arbre opposé au cylindre; le piston porte deux ou quatre tiges entre lesquelles passe l'arbre, le vilebrequin et la bielle. On a ainsi, comme encombrement, d'un côté de l'arbre, la longueur réunie de la manivelle et du cylindre ou même de deux cylindres en tandem, de l'autre côté, la longueur réunie de la manivelle et de la bielle. Ce système de machines, bien balancé à tous égards, a été le plus usité en France; Dupuy de Lôme en faisait un emploi exclusif sur ses bâtiments.

3° Machines a fourreaux, (fig. 21). La tige du piston est supprimée, et la bielle attelée directement sur le piston. Le fourreau, qui renferme la bielle, se reproduit des deux côtés du piston pour régulariser l'effort de la vapeur sur les deux faces, et pour servir de glissière.

La machine à fourreau, malgré l'augmentation de volume des cylindres, était, de toutes, la plus légère et la moins encombrante; mais sa conduite donnait lieu à beaucoup plus d'incidents que celle de la machine à bielles renversées. La machine à fourreau, inventée par Penn, a été surtout employée en Angleterre.

20. — *Conventions sur le sens des mots haut et bas cylindre.* — Il est à noter que, pour des raisons purement historiques, on nomme toujours *haut d'un cylindre*, quand on dit *haut vapeur* par exemple, ou *haut condenseur*, à l'occasion de la régulation des tiroirs, le côté du cylindre qui se trouve du côté de l'arbre à manivelles, ou du côté où sort la tige de piston, sur une machine à bielle directe; cette définition provient de ce qu'autrefois, dans les machines à roues, l'arbre de couche était au-dessus du cylindre, et qu'effectivement la tige du piston sortait par le haut.

Actuellement, dans les machines verticales, le *bas vapeur* et le *bas condenseur* correspondent donc à l'espace situé au-dessus du piston, et le *haut vapeur* et le *haut condenseur* se rapportent à l'espace situé au-dessous.

Si l'on veut bien admettre que *haut* et *bas cylindre* n'ont pas de sens autre que d'exprimer, le premier, le côté qui correspond à la double demi-course faisant décrire à la manivelle un arc de plus de 180°, et le second, celui qui correspond à l'arc inférieur à 180°, alors la définition devient acceptable, et elle s'applique avec une égale exactitude aux machines verticales ou horizontales, à bielles directes ou à bielles renversées.

Dans ces conditions, on pourrait cependant, sur les épures de régulation, substituer avantageusement aux lettres H et B, abréviations de *haut* et *bas*, les lettres G et P, signifiant *grand arc* et *petit arc*.

§ 3. — Principaux organes des machines.

21. — *Organes fixes. — Parcours de la vapeur.* — Considérons maintenant les principaux organes de la machine, en suivant d'abord le parcours de la vapeur à partir du registre.

Le registre est à la fois, un appareil de manœuvre à la disposition du mécanicien, et un détenteur grossier permettant de maintenir la pression aux chaudières, quand la production de vapeur est inférieure à ce que la machine peut consommer.

Au sortir du registre, la vapeur se rend à l'appareil de distribution du cylindre à haute pression.

Les appareils de détente variable, qui ont été longtemps d'un usage général, sont à peu près abandonnés, même sur les navires de guerre, depuis l'adoption des détentes successives; le trajet est donc direct du registre à la boite à tiroir.

Dans les machines marines, la distribution par des aprareils à soupapes, si usitée à terre, n'est pas en usage (1). Le tiroir est conduit d'un mouvement continu, par un appareil à excentriques.

Les tiroirs sont de deux modèles, plans ou cylindriques, c'est-à-dire à coquille ou à pistons. Les deux modèles fonctionnent exactement d'après les mêmes principes et donnent une régulation, ou distribution de vapeur, qui dépend de trois éléments, la *course* du tiroir, l'*angle de calage* c'est-à-dire l'angle dont tourne l'arbre de couche entre le passage du piston et celui du tiroir à bout de course, enfin les *recouvrements*, déplacements nécessaires au tiroir, par rapport à sa position à mi-course, pour ouvrir, soit à l'admission, soit à l'évacuation.

1. Je laisse ici de côté la tentative faite sur la *Naïade* et l'*Iphigénie*.

L'étude de ces éléments est l'objet des *épures de régulation*; nous nous bornerons à indiquer, ici, que les recouvrements sont positifs, parce que l'introduction et l'évacuation ont lieu pendant une période inférieure à la demi-révolution complète de la machine, que les recouvrements à l'admission sont les plus grands, parce que la période d'admission est moindre que la période d'évacuation.

L'appareil de mise en train a pour but principal de faire passer la manivelle, réelle ou fictive, conduisant le tiroir, d'un côté à l'autre de la manivelle de l'arbre, en disposant ainsi la régulation, soit pour la marche en avant, soit pour la marche en arrière. Le plus souvent il permet de faire varier à volonté la position de cette manivelle, de manière à obtenir des régulations intermédiaires et une certaine variation de la détente ; dans ce cas, en mettant la mise en train au point milieu, où l'angle de calage est nul, on tient la machine stoppée.

Dans l'intérieur du cylindre, la vapeur passe par les quatre périodes principales, d'admission, de détente, d'évacuation, de compression, qui déterminent la forme des *diagrammes*.

Les cycles de la thermodynamique sont les diagrammes de machines fictives qui seraient fort différentes des machines à vapeur ; les deux courbes adiabatiques du cycle de Carnot, par exemple, ont de l'analogie, l'une avec la courbe de détente, l'autre avec la courbe de compression, en tenant compte toutefois de ce que la détente et la compression s'opèrent sur des poids de vapeur très différents ; les deux courbes isothermiques ne correspondent nullement à l'admission et à l'évacuation.

La vapeur passe dans les cylindres successifs, en subissant chaque fois une détente déterminée par la grandeur croissante du volume de ces cylindres.

Le plus souvent aujourd'hui, il y a trois cylindres, que l'on désigne par les lettres HP, MP, BP, ou haute pression, moyenne pression, basse pression ; on fera mieux de numéroter les cylindres par les chiffres 1, 2, 3, 4, quand il y en aura habituellement plus de trois.

Le volume de la conduite de vapeur d'un cylindre à l'autre, ou plutôt d'une boite à tiroir à l'autre, se nomme le réservoir du cylindre auquel la vapeur se rend par cette conduite. Le volume des réservoirs a une influence sur le travail de la vapeur et sur la forme des diagrammes.

Au sortir du dernier cylindre, la vapeur, ramenée par la détente à une pression très inférieure à la pression atmosphérique, se rend au condenseur. Le condenseur est actuellement un organe indispensable des machines marines, parce que les chaudières ne peuvent être alimentées qu'à l'eau douce ; il est, de plus, un élément important de la puissance, parce qu'il permet de pousser beaucoup plus loin la détente

de la vapeur en l'abandonnant à une température beaucoup plus basse. En élevant de 1 kilogramme la pression aux chaudières, on n'obtiendrait nullement l'équivalent de ce que donne un abaissement de pression de 1 kilogramme à l'évacuation.

Les condenseurs sont à surface, puisqu'il importe de recueillir l'eau condensée ; ils se composent d'un faisceau de tubes placés, entre deux plaques de tête, dans un réservoir cylindrique où arrive la vapeur. L'eau circule généralement à l'intérieur des tubes, où elle est distribuée par les *coquilles* qui terminent le condenseur à ses deux extrémités ; cela rappelle assez la disposition d'une chaudière tubulaire, où l'eau réfrigérante prendrait la place des gaz de la combustion.

Le service du condenseur et de l'eau distillée, qui y est puisée pour être renvoyée aux chaudières, nécessite toute une série d'appareils auxiliaires, dont la construction et la conduite demandent les plus grands soins.

Il y a d'abord une *pompe de circulation*, qui imprime à l'eau de mer réfrigérante un mouvement rapide à travers le condenseur ; son tuyautage porte deux prises d'eau à la mer, une entrée et une sortie, plus une prise d'eau à la cale. La pompe de circulation est souvent mue par une machine indépendante ; elle devient une machine d'épuisement quand on établit la circulation de la cale à la mer, en fermant la prise d'eau d'entrée à la mer ; c'est presque toujours une pompe centrifuge.

La *pompe à air* est une grosse pompe aspirante, qui aspire l'eau condensée et fait le vide dans le condenseur ; elle renvoie l'eau dans une *bâche* ou réservoir d'alimentation.

La *pompe alimentaire* est, au contraire, une pompe aspirante et foulante, mais travaillant surtout au refoulement, qui prend l'eau à la bâche et l'envoie aux chaudières.

La pompe à air et la pompe alimentaire, ainsi qu'une petite pompe de cale, étaient autrefois attelées sur la machine principale. Cette disposition existe encore sur la plupart des paquebots. Sur les bâtiments de guerre, ces trois pompes sont généralement conduites par une machine spéciale que l'on nomme la *machine de servitude*. Il y a intérêt à faire conduire les pompes de circulation rotatives par les machines de servitude, auxquelles elles servent de volant.

L'adoption de la machine de servitude a des avantages au point de vue de la facilité de manœuvre des grandes machines, de la condensation de la vapeur pendant les stoppages, et aussi de la simplicité des machines principales ; mais, d'un autre côté, elle constitue une complication assez nuisible.

L'ensemble des tuyautages principaux, pour les trajets de vapeur et

d'eau que nous avons considérés, est assez simple. La complication se trouve dans le tuyautage secondaire comprenant, d'abord le réseau spécial de distribution de la vapeur aux appareils auxiliaires et celui de son évacuation, qui se fait, tantôt dans un des réservoirs intermédiaires des cylindres, tantôt au condenseur, puis l'envoi de vapeur direct aux cylindres à basse pression pour faciliter la mise en train, l'envoi de vapeur aux enveloppes extérieures des cylindres ou chemises de réchauffage, enfin tous les réseaux de purges de tuyautage, purges de cylindres, purges de boites à tiroirs, purges des enveloppes, avec tous les accessoires de bouteilles de purge, caisses de purge et de purgeurs automatiques.

Il existe quelquefois tout un tuyautage spécial, avec un jeu de soupapes, permettant de faire varier le rôle de certains cylindres, tantôt admetteurs, tantôt détenteurs, et de changer ainsi le nombre des détentes successives selon la puissance que l'on veut réaliser ; cette disposition, qui peut être rationnelle en principe, ne s'est pas répandue, à cause des complications qu'elle entraîne.

22. — *Organes mobiles.* — Si maintenant nous passons à la description des organes mécaniques, nous rencontrerons les dispositions habituelles à toutes les machines, dans le *piston* et sa garniture étanche, la *tige* et son presse-étoupes, la traverse de piston, appelée aussi *joug*, qui porte les patins de glissières et les tourillons, enfin la *bielle* articulée sur les tourillons.

A bord des paquebots, les pistons portent assez souvent des *contre-tiges*, qui travaillent comme guides dans le plateau supérieur des cylindres. Sur les machines verticales des bâtiments de guerre, il n'y a jamais de contre-tiges, à cause du manque de hauteur ; mais on a quelquefois donné deux tiges aux pistons de très grand diamètre.

La bielle est plus courte que dans les machines terrestres ; le pied de la bielle est généralement à fourche, pour embrasser la traverse de piston ; la tête de bielle passe entre les deux manivelles d'un vilebrequin compris lui-même entre deux paliers de l'arbre coudé.

Parmi les mécanismes en mouvement, les appareils de conduite des tiroirs et de renversement de marche présentent des dispositions très variées ; ils exigent parfois de l'observateur un sérieux effort d'attention, soit à bord, soit sur les plans, pour bien se rendre compte du service de chaque pièce.

Divers organes particuliers aux machines marines se trouvent sur la ligne d'arbres, qui comprend l'*arbre à vilebrequin*, ou arbre coudé, l'*arbre porte-hélice* et l'arbre ou les *arbres intermédiaires*.

Le *palier de butée*, à anneaux saillants, est destiné à recevoir la poussée de l'hélice et à le transmettre à la coque.

Le *presse-étoupes* de l'arbre est à l'entrée du tube de sortie, qui s'appelle *tube d'étambot*, pour les hélices placées dans l'axe du navire. Il y a de plus des presse-étoupes rudimentaires, au passage dans les cloisons étanches.

Le *vireur*, à roue striée et vis tangente, est placé sur l'arbre à vilebrequin, et sert à faire tourner la machine a froid ; il est mû, en général, par une petite machine à vapeur, qui peut conduire aussi la manœuvre de la mise en train. Le vireur constitue un frein très sûr, la vis n'étant pas réciproque.

L'*embrayage* est placé à la jonction de deux bouts d'arbres. Il était surtout nécessaire lorsqu'on avait à affoler l'hélice pour naviguer à la voile ; l'hélice affolée tournait quand le navire atteignait 4 nœuds environ, et la vitesse s'accroissait aussitôt d'un nœud. On a cru quelque temps qu'il pouvait y avoir intérêt, sur les bâtiments à deux hélices, à affoler une hélice pour marcher avec l'autre machine ; cette pratique est aujourd'hui condamnée par l'expérience ; mais le désembrayage reste utile pour le cas où l'on aurait à réparer une des machines. Sur les machines à 3 hélices, le désembrayage est nécessaire, pour marcher aux allures réduites, en affolant, soit l'hélice centrale, soit les hélices latérales.

Le *frein* placé en arrière de l'embrayage, sert à saisir l'arbre porte-hélice pour l'immobiliser, quand, après avoir affolé l'hélice, on veut la réembrayer.

Sur les premiers bâtiments de guerre à hélice et même sur les frégates cuirassées, l'arbre de l'hélice portait un tambour, sur lequel on pouvait enrouler une corde sans fin allant au cabestan du navire. On pouvait ainsi, après avoir désembrayé, faire tourner l'hélice à bras d'hommes et imprimer au navire une faible vitesse.

Les différents bouts de la ligne d'arbres sont jonctionnés ensemble par des *tourteaux*, réunis par des *soies*, quand le joint est à l'intérieur du navire. Pour les jonctions d'arbres tombant en dehors du navire, on emploie un manchon de jonction claveté sur les deux bouts d'arbres.

La ligne d'arbre, sur l'arrière du presse-étoupes, est soutenue par plusieurs paliers dont le premier se trouve immédiatement en arrière du presse-étoupes, quand l'arbre n'est pas soutenu, près du presse-étoupes, par le palier de butée. Ces paliers, qui ne peuvent se graisser, sont garnis en bois de *gaïac*. Le dernier palier, sur les arbres placés dans l'axe, se nomme *chaise d'étambot* ; on nomme aussi *chaises* les derniers paliers arrière des hélices latérales, soutenus, soit par des sup-

ports en V, soit, sur certains paquebots, par des excroissances latérales de la carène.

Enfin, à l'extrémité de l'arbre, se trouve l'hélice, dont les ailes sont tantôt venues de fonte avec le moyeu, tantôt rapportées et fixées par des boulons ou des clavettes, et dont les éléments de puissance sont le *diamètre*, et le *pas*, puis accessoirement, la *fraction de pas* et le nombre d'ailes pour une même fraction de pas totale.

La description sommaire qui précède est suffisante pour permettre de visiter une machine, ou d'examiner un atlas, en se rendant compte des dispositions générales. Elle était indispensable, comme guide général, pour l'étude que nous allons entreprendre maintenant, en commençant par les chaudières.

PREMIÈRE PARTIE

FONCTIONNEMENT DES CHAUDIÈRES

CHAPITRE IV

CHAUFFAGE AU CHARBON

§ 1. — Généralités

23. — *Rendement des chaudières. Tableau des chaleurs de vaporisation.* — Dans toute chaudière, on considère en premier lieu la puissance de vaporisation, qui a, pour premier facteur caractérisant la perfection du modèle, le rendement, c'est-à-dire le rapport entre la quantité de chaleur utilisée dans la vaporisation de l'eau et celle qui serait produite dans la combustion parfaite du charbon.

Le charbon sera étudié plus loin. Rappelons de suite quelle est la quantité de chaleur nécessaire, pour porter de 0° à $t°$ un kilogramme d'eau, et la transformer, à cette température, en vapeur saturée et sèche aux diverses pressions en usage.

PRESSION en kilog. par cm².	TEMPÉRATURE t	Δt	NOMBRE de calories Q	Δ Q
1	99°078		636,719	
		20,482		6,247
2	119,560		642,966	
		23,248		7,090
4	142,808		650,056	
		15,085		4,617
6	157,943		654,673	
		11,516		3,512
8	169,459		658,185	
		9,437		2,875
10	178,886		661,060	
		8,049		2,455
12	186,935		663,515	
		7,058		2,153
14	193.993		665,668	
		6,327		1,930
16	200,322		667,598	
		5,745		1,752
18	206,067		669,350	
		5,274		1,609
20	211,341		670,959	
		4,884		1,490
22	216,225		672,449	

Le second facteur de la puissance de vaporisation totale d'une chaudière est la quantité totale de charbon qui peut être brûlée. Il dépend principalement de la surface de grille et de l'intensité du tirage.

24. — *Autres propriétés des chaudières.* — En dehors du rendement, on juge de la valeur d'un modèle de chaudière, principalement par les garanties qu'il présente, soit sous le rapport de l'usure, soit sous celui des avaries ou des accidents.

Le rendement et la sécurité dépendent, en partie des dispositions de l'appareil et du soin des constructeurs, en partie de l'habileté des chauffeurs.

Nous avons surtout à nous occuper de la construction. Au chauffeur, on ne peut fixer des règles de conduite bien précises, que pour les chaudières tubulaires de l'ancien modèle longtemps éprouvé; ces règles s'appliquent en général aux chaudières tubuleuses, en ajoutant quelques recommandations spéciales, soit pour la conduite des feux, soit surtout pour la surveillance des niveaux et de l'alimentation.

§ 2. — Le charbon et les grilles.

25. — *Composition du charbon. Son analyse élémentaire.* — La houille employée à chauffer les chaudières comprend deux éléments combustibles, le carbone et l'hydrogène; une partie du carbone et tout l'hydrogène y entrent à l'état de composés chimiques, carbures d'hydrogène, eau, ammoniaque, etc. Le soufre s'y rencontre aussi quelquefois en proportion appréciable, principalement à l'état de pyrite.

L'hydrogène, en brûlant, développe, par kilogramme, 34 462 calories, et se combine avec 8 kilogrammes d'oxygène.

Le carbone pur (provenant de la calcination du bois) développe, en brûlant complètement et se transformant en acide carbonique, 8080 calories par kilogramme; il consomme $2^k,67$ d'oxygène. Le pouvoir calorifique du carbone diminue un peu, si le carbone est très compact; il tombe à 7 700 calories pour le diamant.

Le carbone du bois, en se transformant en oxyde de carbone, par sa combinaison avec $1_k,335$ seulement d'oxygène, développe 2473 calories.

L'oxyde de carbone en brûlant développe, par kilogramme de carbone contenu, 5607 calories, complétant ainsi la production de 8080 calories. La différence de 3134 calories, entre 5607 et 2473, est la chaleur latente de la vapeur de carbone.

Le pouvoir calorifique d'une houille est égal à la somme des pouvoirs calorifiques de l'hydrogène et du carbone qui y entrent, diminuée de la chaleur de dissociation des composés où figurent ces éléments. Cette loi a été vérifiée, à la condition d'ajouter au pouvoir calorifique du carbone sa chaleur latente de vaporisation, lorsqu'il entre dans un carbure volatil, faute de quoi on arriverait à des chaleurs de dissociation négatives. En pratique, le pouvoir calorifique des combustibles se détermine par des expériences calorimétriques; l'instrument adopté en dernier lieu est la *bombe calorimétrique* de MM. Berthelot et Vieille, où la combustion se fait sous pression dans l'oxygène pur; cet instrument est très simple, et pourrait passer facilement de la main des physiciens dans celle des ingénieurs intéressés à l'étude des charbons.

L'étude un peu théorique des charbons, qui consiste dans la mesure du pouvoir calorifique et dans l'analyse élémentaire, a été faite par un grand nombre d'expérimentateurs. Les résultats obtenus, principalement pour les charbons anglais, se trouvent dans l'ouvrage de M. Stromeyer et l'aide-mémoire de M. Seaton, dont a été extrait le tableau suivant :

	POUVOIR calorifique	RÉSULTATS DE L'ANALYSE ÉLÉMENTAIRE						
		C	H	O	S	Az	Eau	Cendres
Nixon spécial p. navig.	8339	88,03	4,11	1,98	0,66	0,96	1,02	3,22
TYLESLEY Thoperley et Cie	6450	68,13	4,78	4,86	1,39	1,22	4,72	14,90
TYLESLEY Cie de charbonnage	7072	74,46	5,10	8,25	0,49	1,53	6,07	4,09
Bickschaw . . .	7461	78,93	4,90	7,24	1,04	1,56	4,86	1,96
Pemberton	7244	72,41	5,16	8,84	0,93	1,41	6,70	4,55
Camhawke	7455	69,77	4,82	12,44	1,17	1,33	7,15	3,31
Wigan	7549	76,49	4,96	8,46	1,07	1,44	4,84	2,75
Ebbw (Cardiff). . .	9012	87,78	5,15	0,39	1,02		3,66	
Cardiff moyen . . .	8256	88,87	4,79	4,15	1,43		5,89	
Newcastle moyen . .	8233	82,12	5,31	5,69	1,24		5,12	
Lancashire moyen . .	7732	79,90	5,32	9,53	1,44		6,18	
Briquettes de Warlichs	9162	90,02	5,56	»	1,62		»	
Coke supr de Durham.	7129	85 à 92	»	»	0,25 à 2		4 à 12	
Pétrole	11244	84,7	13,1	2,2	0,00		0,00	

Nous joindrons, à ces chiffres, les suivants, qui ont été donnés par M. Scheurer-Kestner pour trois charbons français :

	POUVOIR calorifique	C	H	O + S + Az
Ronchamp	9122	89,09	5,09	5,82
Anzin	9257	84,45	4,21	11,32
Anthracite	9456	88,03	4,11	3,60

Les nombreuses tentatives, faites pour exprimer algébriquement le pouvoir calorifique en fonction des résultats de l'analyse élémentaire, n'ont pas abouti. La plus ancienne, celle de Dulong, consistait à adopter simplement la formule

$$8080\,C + 34462\left(H - \frac{O}{8}\right),$$

en négligeant la chaleur de dissociation, etc. Pour tenir compte de cette chaleur, il faudrait avoir exactement la *composition immédiate*, c'est-à-dire l'analyse de la houille en éléments composés, y entrant à l'état de simple mélange.

26. — *Classification de Gruner. Analyse immédiate. Qualités exigées des charbons de la marine.* — M. Gruner, dans son traité de métallurgie, a donné une classification des houilles, en prenant pour caractère spécifique principal la longueur de la flamme, et montré qu'elle correspond bien à la composition, non pas élémentaire, mais immédiate en éléments fixes et volatiles. Cette classification suit l'ordre des densités, et, très probablement, l'ordre de formation géologique, en allant du lignite à l'anthracite.

Le classement obtenu est résumé dans le tableau suivant :

		RÉSIDU de coke	MATIÈRES volatiles	POIDS spécifique	POUVOIR calorifique
Lignite gras . . .		30 à 45	70 à 55	1,15 à 1,20	7000 à 8000
Houilles	1 Sèche à longue flamme	50 à 60	50 à 40	1,25	8200 à 8300
	2 Grasse à longue flamme	60 à 68	40 à 32	1,28 à 1,30	8500 à 8800
	3 Grasse à flamme ord^re.	68 à 74	32 à 26	1,30	8800 à 9300
	4 Grasse à flamme courte	74 à 82	26 à 18	1,30 à 1,35	9300 à 9600
	5 Maigre ou anthraciteuse	82 à 90	18 à 10	1,35 à 1,40	9500 à 9200
Anthracite		90 à 95	10 à 5	1,40 et au-dessus	9200 à 9000

L'analyse immédiate de Gruner consiste dans une simple distillation lente, poussée jusqu'à laisser un résidu de coke calciné; les produits de la distillation consistent en eau ammoniacale, bitumes et gaz carbonés.

L'analyse élémentaire, quand on passe de la houille n° 1 de Gruner à la houille n° 5, donne une proportion d'hydrogène à peu près constante, variant de 5 à 4 % irrégulièrement; la proportion de carbone varie seulement de 75 à 93 au lieu de 50 à 90, et la proportion d'oxygène et d'azote réunis descend de 20 à 3 %.

Les houilles n^{os} 1 et 4 ont, pour des raisons différentes, la propriété commune de ne pouvoir s'agglutiner et d'être impropres à la fabrication du coke. Les houilles n° 3 sont, au contraire, des houilles maréchales faisant la voûte. Les houilles n° 4 sont par excellence le combustible des chaudières marines. C'est à cette dernière catégorie qu'appartiennent, en Angleterre les charbons de Cardiff, en France ceux d'Anzin.

Pour les charbons employés à faire des briquettes, on descend volontiers à la proportion de 14 % de matières volatiles ; telle est à peu près la composition du charbon dit *quart-gras d'Anzin* très employé par la marine ; les huit pour cent de brai, ajoutés pour agglomérer les menus, augmentent de 4 % la proportion finale des matières volatiles. Les briquettes faites avec des charbons trop maigres, à 10 % par exemple de matières volatiles, se désagrégeraient dans les foyers, quelque fut la proportion de brai, et le charbon, retourné à l'état de menu, passerait entre les barreaux.

On exige en France, quand des charbons de nouvelle provenance sont proposés à la marine, qu'ils donnent une proportion minimum de 73 % de coke, avant de les admettre aux expériences de recette.

En résumé, les mesures calorimétriques et les analyses élémentaires indiquent approximativement la valeur d'une houille comme combustible marin. L'analyse immédiate et le classement dans le tableau de Gruner fournissent des données presque certaines. Pour être absolument fixé, il faut essayer le charbon dans les conditions même du service à bord.

27. — *Expériences de recette des charbons de la marine française.* — Les instructions toujours en vigueur, sur les essais de charbon de la marine, remontent au 25 janvier 1861 et au 8 avril 1864, c'est-à-dire à l'époque de M. Dupuy de Lôme ; elles ont eu pour but spécial la recherche des combustibles les mieux appropriés aux chaudières rectangulaires à retour de flamme, qui étaient exclusivement employées il y a trente ans.

La puissance évaporatoire des combustibles se détermine en mesurant très exactement le poids d'eau évaporée dans une chaudière d'essai, par kilogramme de charbon, en brûlant en tout 500 kilogrammes de charbon.

On tient compte de la facilité de combustion, d'après laquelle on distingue les *charbons ardents*, ou de combustion rapide, et les *charbons lents*. La qualité, sous ce rapport, est déterminée par le poids maximum de charbon que l'on peut brûler par heure et par mètre carré de grilles, au tirage naturel. Le grand intérêt, qu'il y avait autrefois à brûler beaucoup au tirage naturel, faisait rechercher les charbons ardents, en remontant au-dessus du n° 4 dans la série de Gruner. Cette propriété a perdu son importance, depuis que l'on emploie, pour la marche accélérée des machines, des procédés de tirage artificiel permettant même de faire un bon emploi de l'anthracite.

Le troisième ordre de mesures, dans la chaudière d'essai, porte sur les résidus de mâchefer et d'escarbilles, laissés par le charbon, ainsi que sur la suie déposée dans les tubes; ces mesures sont importantes, parce qu'en marche le décrassage des feux et le ramonage des tubes sont des opérations pénibles, même fatigantes pour les chaudières, sans parler de la perte de chaleur qu'elles occasionnent.

On mesure aussi le résidu total de cendres que laisse un échantillon de charbon calciné dans un creuset ; mais cette expérience, qui ne distingue pas le mâchefer de l'escarbille infusible, a moins d'intérêt que la combustion sur la grille elle-même (1); l'expérience de calcination sert surtout comme analyse immédiate donnant la proportion de coke et de produits volatils.

Enfin, on mesure la cohésion du charbon, c'est-à-dire son aptitude à subir les manipulations du bord, sans se réduire en poussier. Sur ce point, le mode d'opérer n'a pas varié depuis l'origine. Le charbon d'épreuve est placé dans un tambour de dimensions réglementaires, auquel on fait exécuter 50 tours en deux minutes ; puis il est passé au crible ; la proportion du poids restant sur le crible au poids total, qui doit toujours être de plus de moitié, se nomme *cohésion*.

Les premières expériences sur la chaudière d'essai ont donné des résultats, en partie imprévus, dont les plus importants sont consignés dans un rapport de M. Picart inséré au *Mémorial du Génie Maritime* (année 1867, 2e livraison). Ce rapport a établi que le mélange de Cardiff et de Newcastle, alors adopté pour tous les essais de navires, était infé-

1. Dans la combustion sur les grilles, les escarbilles entraînent une proportion de charbon de 10 à 30 0/0 de leur propre poids; on trouve quelqu'avantage, dans les chauffes lentes, à rebrûler les escarbilles.

rieur au simple charbon d'Anzin, à la fois sous le rapport de la puissance de vaporisation, de l'ardeur et de la cohésion : les achats de charbon en Angleterre furent aussitôt suspendus, et la fabrication des briquettes dans notre bassin houiller du nord développée.

Pendant plus de vingt ans, les essais de charbon se sont poursuivis dans les ports, avec l'ancienne chaudière rectangulaire, timbrée à $1^k,80$, qui suffit parfaitement pour des études comparatives ; il s'est accumulé ainsi une masse considérable de documents sur les charbons français de diverses origines. On a brûlé de 100 à 130 kilogrammes de charbon par heure et par mètre carré de grilles, selon la provenance des charbons, feux toujours poussés, en vue de déterminer l'ardeur. La vaporisation d'eau, qui descend à 6 litres par kilogramme de charbon pour les provenances inférieures, s'est élevée à $8^l,6$ avec les briquettes de bonne qualité.

Les quantités de mâchefer, d'escarbilles, de suie, ont varié dans de grandes proportions ; les chiffres satisfaisants, rarement atteints, faciles à retenir comme termes de comparaison, ont été 3 % de mâchefer, 3 % d'escarbilles, 0,3 % de suie.

Depuis quelques années, on remplace, par des chaudières cylindriques timbrées à 8 kilogrammes, les anciennes chaudières d'essai réglementaires qui sont usées. Ce changement, a moins d'intérêt pour la comparaison des charbons entr'eux, que pour celle des chaudières. La quantité d'eau vaporisée avec les nouvelles chaudières, est un peu supérieure, ce qui n'a rien d'étonnant, la disposition des foyers et des tubes étant plus avantageuse, puisque, d'autre part, la quantité de chaleur contenue dans la vapeur à 8 kilogrammes est plus forte de 1/40 seulement que dans la vapeur à 2 kilogrammes de pression. Les briquettes de bonne qualité vaporisent maintenant jusqu'à $9^l,6$ d'eau par kilogramme de charbon.

A l'ancien essai à feux poussés, on a joint un essai à feu retenu, dans lequel on s'attache à brûler 80 kilogrammes par mètre carré de grilles pour tous les charbons ; dans cet essai, la puissance de vaporisation ne se trouve accrue que de zéro à un vingtième ; le résultat justifie à peine la dépense de l'expérience.

Une innovation plus utile consiste à faire une expérience au tirage forcé, dans laquelle on s'attache à brûler 150 kilogrammes par mètre carré de grilles ; la puissance de vaporisation est alors réduite d'un septième environ, et ne dépasse guère 8 litres par kil. de charbon.

Le tableau suivant indique les conditions de recette imposées dans les marchés récents, et généralement dépassées dans les essais de recette ; la puissance de vaporisation inscrite se rapporte à une combustion de 100 kilogrammes par mètre carré de grilles.

DÉSIGNATION DU CHARBON		PUISSANCE de vaporisation	COHÉSION	RÉSIDU de cendres à la coupelle
Briquettes d'Anzin	pour torpilleurs	8l,6	0,58	3,25 %
	ordinaires. . .	8l,4	0,55	7,00
Briquettes de Bessèges	pour torpilleurs	8l,6	0,53	3,25
	ordinaires. . .	8l,5	0,53	5,00

C'est à l'aide d'expériences répétées sur la chaudière d'essai, que l'on est parvenu à obtenir, pour le service des torpilleurs, des briquettes équivalentes au fameux charbon de Nixon.

28. — *Particularités des expériences faites dans divers pays.* — Les essais de vaporisation s'exécutent aujourd'hui dans beaucoup de pays, et tendent à devenir de véritables expériences de laboratoire d'une grande précision, dans lesquelles le titre de la vapeur produite est mesuré au calorimètre, les gaz de la fumée analysés, etc. Il convient naturellement pour avoir des comparaisons rigoureuses, de tenir compte de la température initiale de l'eau d'alimentation, que l'on ramène en général à 10 degrés par une correction de peu d'importance. Il faut aussi tenir compte de la pression et par suite de la température de la vapeur. Cette seconde correction, qui atteint 21,5 calories quand on passe de 2 kilogrammes à 12 kilogrammes de pression, n'est plus que de 9 calories quand on passe de 12 à 22 kilogrammes; elle devient donc insignifiante quand il s'agit de comparer entr'elles des chaudières à très haute pression.

En Angleterre, on ramène toujours le poids d'eau vaporisée à ce qu'il serait avec de l'eau à 100 degrés, transformée en vapeur à 100 degrés, pour corriger les effets des variations de température de l'eau et de la vapeur. Le kilogramme d'eau vaporisé correspond, dans ces conditions, à 537 calories dépensées. Supposons une chaudière vaporisant 9 kilogrammes d'eau à 10 degrés, à la pression de 20 kilogrammes ; son pouvoir après correction sera :

$$9\,\text{k.} \times \frac{670{,}96 - 10}{527} = 11^{\text{k}},07$$

nombre très différent de 9 kilogrammes.

La mesure du rendement par la vaporisation est presque toujours inexacte, parce qu'on ne tient pas compte du titre de la vapeur. C'est

pour cela que la consommation de charbon par cheval reste la meilleure des indications.

29. — *Description des grilles ; modèles divers. Soles. Autels.* — Le charbon se brûle sur des grilles de modèles variés, presque toujours en fer forgé, quelquefois, avec certains charbons, en fonte de fer.

Le modèle de la marine française (fig. 22) est constitué de barreaux de 0m,85 au maximum de longueur, présentant à la partie supérieure 25 millimètres de largeur et séparés par des vides de 15 millimètres ; l'écartement des barreaux est assuré par leurs talons, de 7 millimètres environ de saillie, entre lesquels on laisse un peu de jeu pour la dilatation. Cette grille convient bien, pour le charbon d'Anzin étendu en couche de 15 centimètres d'épaisseur, au tirage naturel.

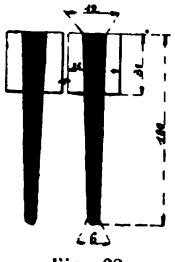
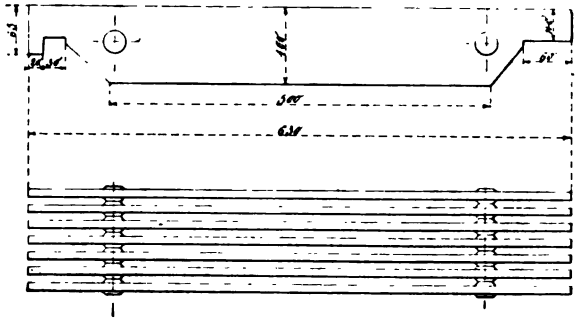


Fig. 22

Fig. 23



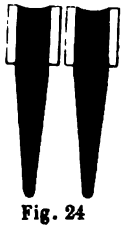


Fig. 24

Fig. 23 *bis*

L'Amirauté anglaise emploie des grilles plus fines, de 10 millimètres de plein seulement avec 6 ou 8 millimètres de vide, disposées comme l'indiquent les figures 23 et 23 *bis*. Quelquefois, en Angleterre, les barreaux sont assemblés deux à deux par des entretoises. Cette disposition, qui est employée aussi sur bon nombre de torpilleurs français, rend les barreaux plus rigides ; elle permet de porter leur longueur à 1m,30 ou 1m,40.

En Amérique, on donne à la partie supérieure du barreau une forme cannelée (fig. 24), destinée à retenir le mâchefer liquide. On assure que la durée des grilles est ainsi accrue.

Dans le montage de la grille, on a soin de ne jamais laisser de jeu,

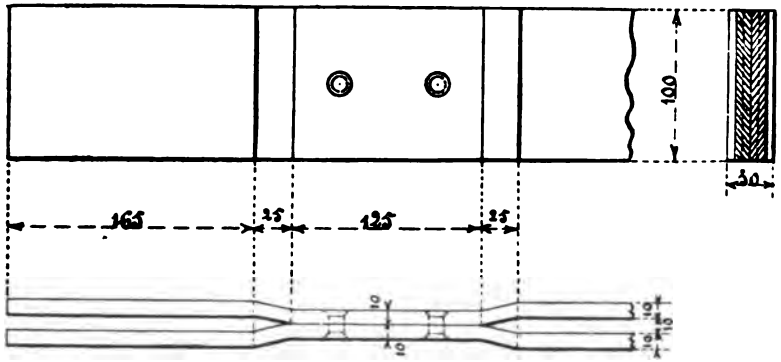


Fig. 25

Fig. 25 *ter*

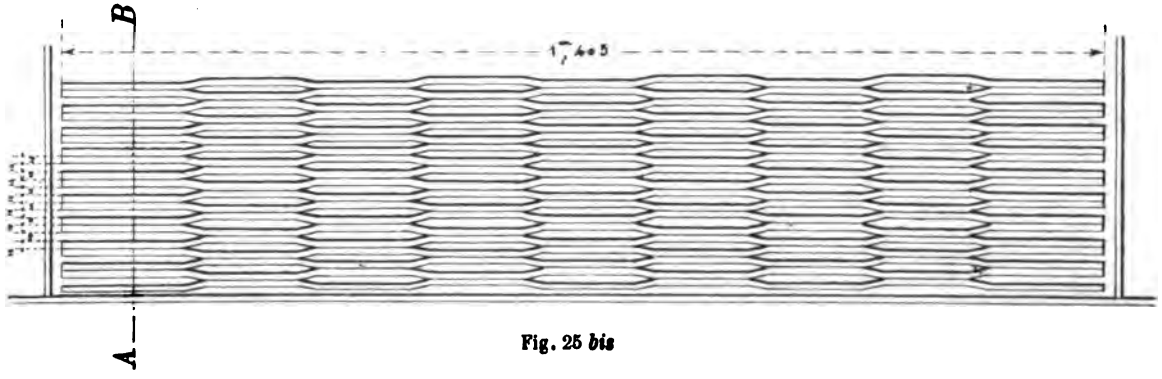


Fig. 25 *bis*

entre la paroi du foyer et le barreau voisin, afin d'éviter l'afflux d'air et l'élévation de température en cet endroit.

Sur les chaudières Belleville, on a longtemps employé un système de grille formé de barreaux minces, travaillés suivant un contour brisé et assemblés deux à deux par des rivets. La figure 25 représente un groupe de deux barreaux; le passage de l'air se fait par les intervalles hexagonaux que l'on voit sur le plan d'ensemble (fig. 25 *bis*).

MM. Niclausse ont adopté des grilles à barreaux extrêmement rapprochés ; le jeu laissé pour le passage de l'air n'est que d'un à deux millimètres. La largeur des barreaux est d'un centimètre.

Fig. 26

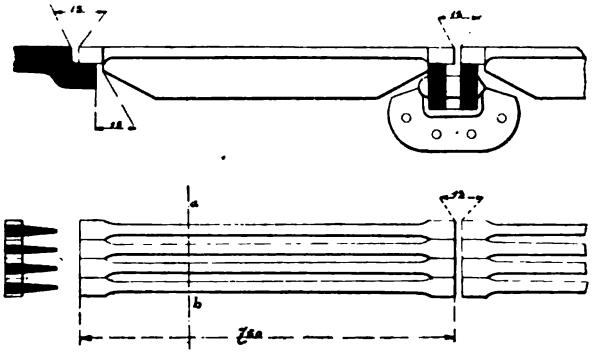


Fig. 26 *bis*

Les talons des barreaux reposent toujours sur des sommiers formés de deux traverses, ou barres entretoisées, séparées par un vide ; à l'avant, ils reposent sur une sole en fonte pleine, assez large pour qu'il n'y ait pas de combustion auprès de la porte. Les sommiers et la sole sont supportés par des cadres en cornières rivés au foyer (fig. 26 et 26 *bis*).

On emploie, en Amérique, des grilles secouables de divers modèles qui facilitent le travail des feux, et qui ont été empruntées par la marine aux locomotives américaines.

La grille s'arrête, à l'arrière, à un autel établi sur une armature en fonte ou en acier moulé (fig. 7 à 11); l'autel retient le charbon, relève la flamme, ferme le fond du cendrier; il est souvent percé de trous pour le passage de l'air.

§ 3. — Du tirage naturel.

30. — *Calcul de la dépression qui produit le tirage, et de la vitesse qui y correspondrait dans un circuit non résistant.* — Le tirage est dû à la différence, entre le poids de la colonne d'air chaud intérieure, du dessus

de la grille au sommet de la cheminée, et le poids de la colonne d'air atmosphérique correspondante à l'extérieur.

La dépression intérieure, résultant de cette différence de poids et des conditions du mouvement, se mesure, en général, non au-dessus de la grille, mais dans la boite à fumée. L'instrument employé est un petit manomètre à eau, soumis, dans une de ses branches, à la pression intérieure, et dans l'autre à la pression atmosphérique; par suite, la dépression, que l'on nomme usuellement le tirage, est exprimée en millimètres d'eau.

La colonne gazeuse de la cheminée étant à une température voisine de 300°, son poids spécifique est à peu près la moitié de celui de l'air froid. La dépression à la base de la cheminée, en considérant le mouvement comme uniforme à partir de ce point jusqu'au sommet, est donc $\frac{1}{2}$ H, si on l'exprime en hauteur d'air, et que H soit la hauteur de la cheminée; cette même dépression, exprimée en millimètres d'eau au lieu de mètres d'air, sera :

$$(1) \qquad h = \frac{1}{2} H \times \frac{1,3}{1000} \times 1000 = \frac{1}{2} H \times \frac{4}{3} = \frac{2}{3} H.$$

Ainsi, à la base d'une cheminée ayant 20 mètres, 15 mètres, 10 mètres de hauteur, ou bien à 20 mètres, à 15 mètres, à 10 mètres au-dessous de l'orifice supérieur d'une cheminée renfermant une colonne gazeuse d'une température uniforme de 300°, se mouvant sans rencontrer de résistance, les dépressions en millimètres d'eau seront respectivement, 13 millimètres, 10 millimètres, 7 millimètres.

Considérons maintenant les vitesses variables de la colonne d'air en ses différents points, les résistances passives étant toujours supposées nulles. Soient V_1 et V_2 les vitesses en mètres, en deux points situés sensiblement à la même hauteur, entre lesquels il n'y a pas de cause de résistance au mouvement; soient h_1 et h_2 les dépressions en ces deux points, toujours exprimées en millimètres d'eau; soient enfin δ_1, δ_2 les poids spécifiques du gaz par rapport à l'air. Entre V_1, V_2, h_1, h_2, on a la relation connue sur les pertes de charge, qui sont ici les augmentations de dépression,

$$(2) \qquad \delta_2 \frac{V_2^2}{2g} - \delta_1 \frac{V_1^2}{2g} = 1,3 (h_2 - h_1)$$

ou simplement, en employant la notation des différences :

$$\Delta \frac{\delta V^2}{2g} = 1,3 \Delta h,$$

ou, encore approximativement, en remplaçant g par 10,

$$\Delta \delta V^2 = 26 \Delta h.$$

Pour le mouvement de l'air chaud, avec $\delta = \frac{1}{2}$, on aurait :

(3) $$\Delta V^2 = 52 \Delta h;$$

pour le mouvement de l'air froid, avec $\delta = 1$, on aurait :

(4) $$\Delta V^2 = 26 \Delta h.$$

Si, par exemple, nous considérons la rentrée d'air froid dans le foyer, par les orifices lui donnant un accès direct à peu près sans résistance, nous trouvons, pour une dépression Δh de 10 millimètres dans le foyer, $V = 16^m,1$; pour la dépression de 13 millimètres, nous aurions encore $V = 18^m,40$. Ces chiffres ne sont applicables qu'aux rentrées d'air directes au-dessus des grilles, quand elles sont assez faibles pour ne pas diminuer la valeur de h. Quand on ouvre la porte des foyers, l'afflux d'air augmente la résistance à travers les faisceaux tubulaires, boites à fumée, cheminée, etc., en même temps qu'il abaisse la température; la dépression au-dessus de la grille diminue donc beaucoup, et l'air n'y entre pas avec la vitesse voisine de 17 mètres indiquée par la formule (4).

31.— *Vitesse réelle de la colonne gazeuse. Résistance des diverses parties du circuit. Section des passages.*— Si nous considérons maintenant l'entrée de l'air par les portes des cendriers, nous trouvons que la formule (4) ne lui est nullement applicable, même à titre d'approximation. On a observé, par exemple, que la vitesse d'entrée d'air dans les cendriers est de $3^m,88$, pour une dépression de $13^{mm},1$ dans la boite à fumée correspondant à une dépression de 11 millimètres environ dans le fourneau; or les vides entre les carreaux de grilles représentent 60 % environ de la surface de grille, soit trois fois la section de la porte des cendriers; la vitesse moyenne de passage d'air entre les barreaux de grilles n'est donc que de $1^m,30$ environ. Si on calcule la dépression correspondant à la vitesse de $3^m,88$, on trouve :

$$\Delta h = \frac{3,88^2}{26} = 0^{mm},58$$

fraction extrêmement faible du tirage total.

A la base de la cheminée, la vitesse de la colonne est beaucoup plus grande, parce que la section de la cheminée est moindre que celle des cendriers, et que le volume des gaz est augmenté par la dilatation; le

poids de la colonne a été, de plus, augmenté de celui du charbon brûlé. Supposons la section de la cheminée égale aux trois quarts de celle des cendriers; le volume des gaz a doublé à la température de 300°; la vitesse est donc 2,66 fois celle à l'entrée des cendriers; l'augmentation de poids, qui atteint à peine un vingtième, est négligeable. La valeur de Δh, correspondant à la vitesse imprimée à la base de cheminée, peut ainsi atteindre :

$$0^{mm},58 \times 2,26^2 = 4^{mm},1$$

environ.

La fraction du tirage de la cheminée, employée à vaincre l'inertie de la colonne gazeuse, et à lui imprimer sa vitesse, est en réalité presque négligeable, en présence de la fraction employée à vaincre les résistances passives dont nous n'avons pas parlé jusqu'ici. En négligeant la résistance très faible à l'entrée de l'air dans les cendriers, la répartition d'un tirage total de 13 millimètres, à travers les diverses parties d'une chaudière tubulaire à retour de flamme, se fait de la manière suivante :

Résistance de la cheminée et des conduits de fumée. . .	$0^{mm}6$
Résistance du faisceau tubulaire.	2 , 6
Résistance de la boîte à feu, autel et fourneau	1 , 4
Résistance d'une grille modérément chargée	7 , 8
Tirage utilisé à vaincre l'inertie de l'air.	0 , 6
Total	$13^{mm}0$

Dans ce tableau, le tirage total de 13 millimètres correspond à la hauteur totale de la cheminée mesurée au-dessus des grilles, en négligeant les différences de tirage ou de dépression, provenant du changement de hauteur quand on passe de la grille à la boite à fumée. Les dépressions réellement observables au manomètre à eau seraient : $0^m/^m,6$ dans le cendrier, $8^m/^m,4$ dans le fourneau, $9^m/^m,8$ à l'entrée des tubes, et enfin $12^m/^m,6$ à la sortie des tubes dans la boite à fumée où on la mesure généralement.

Dans la réalité, la colonne gazeuse n'a point, à travers la chaudière, le mouvement presque uniforme, ou, tout au moins régulier, que supposent les calculs élémentaires. Les dilatations violentes, qui augmentent dans le rapport de 1 à 5 le volume des filets gazeux traversant le fourneau, la contraction qui les ramène ensuite du volume 5 au volume 2, supposent, dans les dépressions, des variations brusques, tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre, qui peuvent atteindre des valeurs comparables à celle du tirage total. Les variations locales échappent à toute évaluation. Pour l'ensemble du mouvement, on peut considérer avec intérêt le tableau suivant, relatif, comme le précédent, à la chaudière tubu-

laire à retour de flamme; on pourrait même en déduire les valeurs de Δh correspondant aux changements de ΔV^s.

DÉSIGNATION DES PASSAGES	SECTION	TEMPÉRATURE	VITESSE approximative
Portes de cendriers	0,2	30°	4 mètres
Passages libres à travers la grille	0,33	»	»
— le charbon.	0,21 supposé	1600°	28 —
Passages au-dessus des autels .	0,21	1200°	23 —
Boîtes à feu.	0,21	950°	19 —
Entrée des tubes	0,18	700°	15 —
Sortie des tubes.	0,18	350°	»
Cheminée	0,15	300°	10 —

Dans ce tableau les sections sont rapportées à la surface de grille prise pour unité.

Voici, pour quelques chaudières, de modèles différents, le tableau des mêmes rapports des sections de passage d'air.

DÉSIGNATION DES PASSAGES	DUPUY-de-LOME à tubes directs	Torpilleurs 105-114 Chaudière-locomotive	Chaudière auxiliaire type horizontal	Chaudière Bigot pour canots
Portes de cendriers	$0^{m2},257$	$0^{ms},265$	$0^{ms},205$	$0^{m2},244$
Passages libres à travers les grilles.	0 ,307	0 ,517	0 ,318	0 ,519
Passage au-dessus des autels. . .	0 ,236	0 ,370	0 .179	0 ,394
Passage à travers le faisceau tubulaire	0 ,213	0 ,122	0 ,232	0 ,302
Boîte à fumée	0 ,296	0 ,348	0 ,486	0 ,467
Cheminée	0 ,171	0 ,122	0 ,151	0 ,139
Surface de grille pour un corps de chaudière.	$4^{ms},66$	$2^{ms},60$	$0^{ms},66$	$0^{m2},225$

Dans les chaudières tubuleuses, la section de passage des gaz est généralement très grande au sortir de la grille; on s'attache à la réduire à l'aide d'écrans, pour augmenter la longueur du parcours dans le réseau tubuleux. Il est arrivé parfois, même au tirage naturel, que

les chaudières ne présentaient pas une résistance suffisante au mouvement de la colonne gazeuse qui parvenait trop vite à la cheminée ; la température de la cheminée, qui atteint dans ces conditions le rouge sombre à 500° environ, donne en même temps un tirage très actif ; l'entrée d'air froid est alors excessive, et le rendement calorifique de la chaudière très affaibli. Une hauteur de cheminée très grande peut donc créer des conditions défavorables, sur des chaudières à court parcours de flamme ; mais en général on gagne à exhausser les cheminées.

32. — *Hauteur des cheminées.* — On s'est longtemps fixé comme règle de donner aux cheminées une hauteur de 16 mètres au-dessus du seuillet des grilles ; à cette époque, les panneaux d'admission d'air dans la chambre de chauffe présentaient toujours trois fois la section totale des cendriers. Depuis une vingtaine d'années, il est reconnu que l'amélioration du tirage naturel se continue d'une manière sensible au delà des hauteurs de 16 mètres, surtout si la cheminée est entourée d'une double enveloppe qui diminue le refroidissement ; c'est en employant les doubles enveloppes pour la ventilation du bord, que l'on a observé pour la première fois, l'utilité d'un exhaussement des anciennes cheminées, pour le tirage des chaudières.

La hauteur des cheminées dépend, en pratique, du creux des navires. Sur un cuirassé, dont le pont des gaillards est à 10 mètres environ au-dessus du seuillet des grilles, une cheminée a parfois 21 mètres de hauteur totale au-dessus de ce seuillet ; on a atteint 30 mètres pour les cheminées du *Columbia* et du *Minneapolis*, en dépassant de 6 mètres seulement le niveau des passerelles supérieures. Sur une canonnière, dont le pont supérieur est à 3 mètres à peine au-dessus du seuillet des grilles, une hauteur totale de cheminée de 12 à 15 mètres paraît excessive, au spectateur peu familiarisé avec les exigences du tirage. Sur un petit bâtiment, tel qu'un canot à vapeur ou même un torpilleur, la hauteur de cheminée est trop faible pour produire l'appel ; le tirage forcé est toujours indispensable.

L'emploi des ponts protecteurs, dont on cherche à réduire le plus possible les ouvertures, a conduit à diminuer les passages d'air jusqu'à une section parfois inférieure à la section totale des cendriers ; dans ces conditions, le tirage naturel est devenu insuffisant, même pour obtenir la combustion modérée et économique qui correspond à la marche en navigation ordinaire, et cela, quelle que soit la hauteur des cheminées.

§ 4. — Du tirage forcé.

33. — *Anciennes applications du tirage forcé.* — Les chaudières marines n'ont longtemps connu que le tirage naturel. La hauteur de leurs cheminées suffit, pour assurer une activité de combustion analogue à celle des chaudières d'ateliers, et bien en rapport avec les exigences d'un service prolongé; l'usage des condenseurs ne permet pas, d'ailleurs, d'appliquer le système de tirage forcé des locomotives, le seul qui fût autrefois connu. Par exception, l'émission des cylindres à la cheminée a été acceptée sur les canots à vapeur, qui se rapprochaient, dès le début, du mode de fonctionnement des locomotives.

L'utilité d'un dispositif permettant de régler à volonté l'envoi d'air aux foyers a cependant été reconnue depuis longtemps, soit pour accroître un peu la puissance, soit surtout pour obtenir en toutes circonstances la combustion correspondant à un bon tirage naturel. Des tentatives furent faites de bonne heure dans la marine américaine, où les charbons anthraciteux demandent un fort tirage; Stevens y étudia de 1830 à 1850, les systèmes les plus variés par refoulement ou aspiration d'air; M. Isherwood appliqua, en 1861, le système de la chambre close sur dix-huit canonnières; les frégates en bois, qui promenaient le pavillon des États-Unis dans les mers d'Europe vers 1866, étaient munies de ventilateurs centrifuges qui soufflaient dans les cendriers ouverts. Dans le même ordre d'idées, j'ai proposé dès le commencement de 1870, d'établir une soufflerie d'air dans la cheminée; il s'agissait uniquement d'obtenir ce qu'on appelait un bon tirage, c'est-à-dire de brûler facilement un peu plus de 100 kilogrammes de charbon par mètres carrés de grilles, même avec des conditions de chauffe défavorables.

34. — *Appareil Bourdon-Thierry.* — Parmi les anciens dispositifs, il faut citer celui de Bourdon, perfectionné par Thierry, essayé dans la marine française en 1859, bien qu'il vise à l'amélioration du rendement calorifique se manifestant par la fumivorité, plutôt qu'au tirage proprement dit. Cet appareil consiste dans une couronne de jets de vapeur disposés au-dessus de la porte du foyer et soufflant suivant la longueur de la grille. Le brassage de la flamme ainsi obtenu, avec le mélange intime de l'air et des gaz qui en résulte, permet à la combustion de s'opérer très complètement avant l'arrivée de la flamme aux surfaces refroidissantes. M. Aurous avait modifié l'appareil en faisant entraîner une certaine quantité d'air par les jets de vapeur disposés en manière d'éjecteurs; on avait ainsi un certain effet de tirage forcé, du moins au-dessus de la grille.

L'appareil Bourdon-Thierry a été appliqué en France de 1860 à 1870, puis abandonné à la suite d'expériences de M. Joessel démontrant qu'il diminuait le rendement calorifique du charbon et la puissance totale de vaporisation, sur les chaudières à retour de flamme.

Savoie.

Installation de l'appareil fumivore Bourdon-Thierry sur les chaudières

Echelle de 5 cm. pour 1 m.

Vue de face

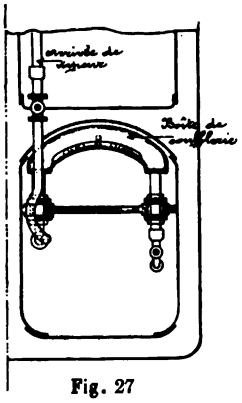


Fig. 27

Coupe longitudinale par l'axe d'un foyer

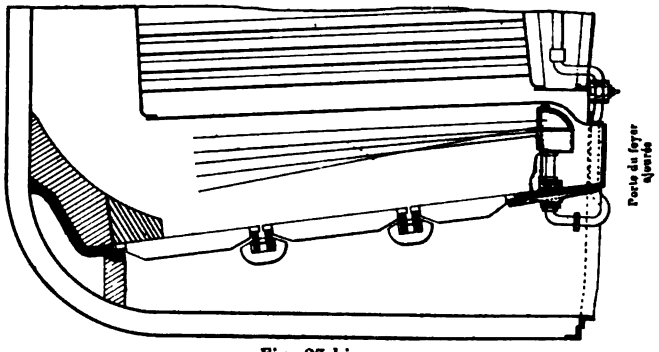


Fig. 27 *bis*

L'adoption des chaudières tubuleuses, où la flamme n'a qu'une longueur de parcours très faible, a fait naître des applications nouvelles de l'appareil *Bourdon-Thierry*. Sur les chaudières Belleville, qui pendant longtemps pouvaient à peine brûler utilement, par mètre carré de grilles, les 100 ou 110 kilogrammes de charbon d'une bonne marche au tirage naturel, cet appareil permet d'activer le tirage jusqu'à une combustion de 130 kilogrammes environ; on emploie alors conjointement deux souffleries, l'une dans la cheminée pour activer le tirage, l'autre dans le foyer pour brasser la flamme. La nécessité d'économiser la vapeur a conduit à remplacer les jets de vapeur par des jets d'air comprimé, dans les appareils Bourdon-Thierry des chaudières Belleville.

35. — *Propriétés générales du tirage forcé.* — Aujourd'hui, l'emploi du tirage forcé tend à se généraliser, en vue d'obtenir deux résultats entièrement distincts, tous deux très importants.

En premier lieu, on se propose de tirer des chaudières toute la puissance évaporatoire dont elles sont susceptibles, même parfois au prix d'une fatigue excessive de leurs organes.

En second lieu, on se propose de supprimer le tirage naturel considéré comme beaucoup trop coûteux, en raison de la perte de chaleur

qu'il impose, et on a recours au tirage forcé, pour extraire des gaz de la combustion la presque totalité de la chaleur qu'ils renferment, avant de les verser dans l'atmosphère.

Les premiers essais, dus à la marine de guerre, ont visé à l'accroissement de puissance. La recherche de l'économie de combustible, beaucoup plus récente, est poursuivie par la marine de commerce.

36. — *Soufflerie de vapeur dans la cheminée. Expériences de M. Joessel.* — En 1869-1870, M. Joessel étudia, à Indret, l'effet d'une soufflerie de vapeur dans la cheminée, concurremment à celui de deux autres moyens de tirage forcé, ventilateur aspirant placé dans la cheminée et ventilateur refoulant en cendrier clos. Ses expériences sur les ventilateurs offrirent peu d'intérêt; le ventilateur aspirant, simple appareil à hélice, ne lui permit pas de brûler plus de 145 kilogrammes de charbon par mètre carré de grilles; avec le ventilateur refoulant, il put pousser la combustion jusqu'à 185 kilogrammes, mais il se heurta à des difficultés pratiques, telles que les projections de flamme par les portes de chargement. Ses expériences sur l'emploi des jets de vapeur furent exécutées au contraire dans de bonnes conditions, et méritent encore d'être consultées.

M. Joessel opérait sur une chaudière d'essai de $1^{m^2},35$ de surface de grille, fonctionnant à $2^k,25$ de pression effective; il empruntait la vapeur des jets, à une chaudière auxiliaire marchant à la même pression. Les résultats, par heure et par mètre carré de grilles, sont résumés dans le tableau suivant :

CHARBON brûlé	QUANTITÉ DE VAPEUR			VAPEUR par kil. de charbon	
	produite	dépensée pour la soufflerie	restant disponible pour la machine	produite	disponible pour la machine
$98^k,5$	$820^k,0$	$0^k,00$	$820^k,0$	$8^k,36$	$8^k,36$
111 ,8	903 ,6	0 ,00	903 ,6	8 ,08	8 ,08
118 ,5	960 ,33	24 ,13	936 ,2	8 ,10	7 ,90
133 ,3	1087 ,36	77 ,76	1009 ,6	8 ,15	7 ,57
148 ,15	1195 ,59	131 ,39	1082 ,2	8 ,19	7 ,30
166 ,66	1571 ,72	198 ,42	1173 ,3	8 ,23	7 ,04
185 ,18	1529 ,86	265 ,46	1264 ,4	8 ,26	6 ,82
200 ,00	1656 ,79	319 ,09	1337 ,7	8 ,28	6 ,68

Ce tableau montre que l'on peut, à l'aide de jets de vapeur directement pris sur la chaudière, pousser la consommation de charbon à 200 kilogrammes, en augmentant constamment la puissance de la machine.

Sans jets de vapeur, M. Joessel parvint à brûler jusqu'à 133k,3 de charbon, mais en produisant seulement 978k,5 de vapeur au lieu de 1087,36; il montra ainsi que l'emploi du tirage forcé améliore parfois le rendement calorifique du combustible.

La chaudière ayant parfaitement supporté tous les essais et l'accroissement de tirage, par appel de la cheminée, n'apportant aucune gêne au service, les expériences de M. Joessel conduisaient à généraliser l'emploi, jusque là restreint, des jets de vapeur à la cheminée; mais on a été, au même moment, arrêté dans cette voie par l'adoption des chaudières à haute pression. L'alimentation à l'eau douce oblige, en effet, à faire passer par le condenseur à surface, la totalité de la vapeur produite par les chaudières. On aurait pu, à la rigueur, conserver une petite chaudière à basse pression et à extraction alimentée à l'eau de mer, pour fournir la vapeur des jets; mais cette solution n'a pas même été proposée

La seule application importante faite, au prix d'une perte d'eau douce, avec une machine à condenseur à surface, a eu lieu sur l'*Hirondelle*, où les jets de vapeur permirent d'accroître momentanément la puissance de 22 %.

37. — *Soufflerie de vapeur dans les cendriers. — Appareil Niclausse.* M. Niclausse a installé récemment, sur une chaudière d'atelier, le tirage

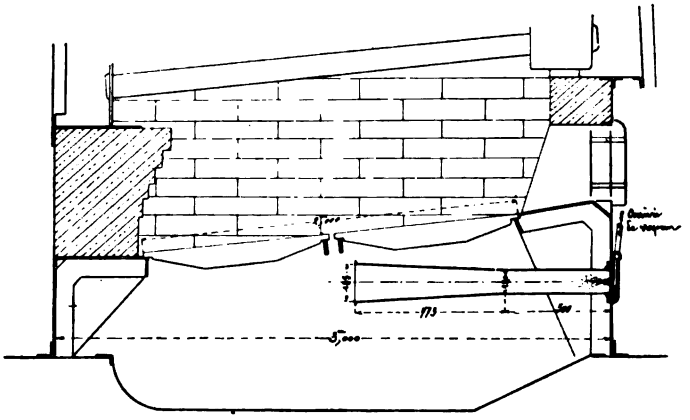


Fig. 28

forcé par insufflation de vapeur en cendrier clos. Le tirage forcé est donné par deux tuyères, ouvrant sur la façade, dans lesquelles débouche un jet de vapeur qui produit l'entraînement d'air à la façon d'un injecteur (fig. 28).

Les résultats obtenus, à diverses activités de combustion, sont les suivants :

SURFACE DE GRILLES : 1m²08 — SURFACE DE CHAUFFE : 52m²15 — RAPPORT : 48,3					
Durée de l'essai	4 h.	5 h.	4 h.	5 h.	5 h.
Combustion par m.q. de grilles.	100 k.	125 k.	150 k.	175 k.	200 k.
Pression de vapeur au tuyau du souffleur	2 k.	4 k.	6k,700	7k,500	8k,500
Pression d'air dans le cendrier . .	3 m/m.	5 m/m.	7 m/m.		
Dépression dans le conduit de fumée	11m/m5	11m/m75	10 m/m.	11 m/m.	11 m/m.
Température des gaz à la sortie de la chaudière	230°	250°	300°	350°	375°
Vaporisation par kilog. de charbon brûlé	8k,550	8k,700	8k,600	8k,480	8k,250
Perte d'eau ou de vapeur du souffleur	3,3 %	4 %	4,5 %	5 %	5,2 %

Le charbon employé était du tout venant ordinaire d'Anzin. La chaudière est timbrée à 14k,500, pression que l'on a maintenue à tous les essais.

Pour mesurer le débit du souffleur, on installait celui-ci, après l'expérience, devant l'orifice supérieur d'un serpentin entouré d'eau et l'on recueillait, au bas, la vapeur condensée; on réglait la prise de vapeur de manière à avoir, au manomètre, la même pression que lors de l'essai.

La proportion de la vapeur dépensée, pour porter à 200 kilogrammes la combustion de charbon, est sensiblement la même que dans les expériences de M. Joessel.

Un résultat très particulier, constaté dans les expériences de M. Niclausse, est la disparition du mâchefer; la totalité du résidu de la combustion se trouve réduit à l'état d'escarbilles infusibles.

38. — *Soufflerie d'air dans la cheminée.* — Les premières propositions faites, pour substituer des jets d'air aux jets de vapeur, furent repoussées sur la supposition que les jets de vapeur devaient être beaucoup plus économiques. Cette idée préconçue ne repose sur aucun fondement : la vapeur, en effet, peut, en vertu de sa faible densité, comprimer à sa propre pression un poids d'air quadruple du sien; de plus il peut y avoir grand avantage à adopter, pour les jets, une pression toute différente de celle de la vapeur. Il y a donc, au contraire, des présomptions en faveur des jets d'air, sous le rapport de l'économie.

Quand l'adoption des hautes pressions eut interdit toute dépense de vapeur, une première tentative fut décidée en 1875 pour le *Fulminant*, sous la réserve d'essais préliminaires qui s'exécutèrent en 1876 sur la *Résolue*.

Sur la *Résolue*, les chaudières étaient cylindriques, timbrées à 4 kilogrammes. La machine soufflante à pistons, moteur à simple détente et à condensation, pouvait dépenser 15 kilogrammes de vapeur environ par cheval. Les buses, établies à la base de la cheminée, avaient une section constante de 745 millimètres carrés par mètre carré de grilles. La pression de l'air montait avec le travail de la machine; elle a varié de 54 à 259 millimètres d'eau.

Les chiffres du tableau suivant ont été établis, en évaluant la dépense de vapeur à 15 kilogrammes par cheval; ils sont rapportés à l'heure et au mètre carré de grilles, et disposés en vue de la comparaison entre les jets d'air et ceux de vapeur.

CHARBON brûlé par *m. q.* de grilles	DÉPENSE DE LA SOUFFLERIE		VAPEUR totale produite	VAPEUR PAR K. DE CHARBON	
	en chevaux	en kil. de vapeur		produite	disponible
96k, 9	0	0	816l,86	8l,43	8l,43
128, 6	1	15	1055,81	8,21	8,09
140, 5	2	30	1124,00	8,00	7,78
150, 0	3	45	1168,50	7,79	7,49
159, 4	4	60	1213,03	7,61	7,28
169, 2	5	75	1269,00	7,50	7,06
179, 0	6	90	1317,44	7,36	6,85
188, 0	7	105	1342,32	7,14	6,58
197, 0	8	120	1379,00	7,00	6,39

Le rendement calorifique, pour la chaudière de la *Résolue*, a été constamment en diminuant, quand l'activité du tirage allait en augmentant,

tandis qu'il était resté à peu près constant dans les expériences d'Indret. Cette différence ne peut être attribuée qu'à la disposition des chaudières et à la conduite de la chauffe. Pour comparer les deux systèmes de tirage, par jets de vapeur et jets d'air, il faut considérer les dépenses de vapeur correspondant à une même intensité de combustion, ce qui donne 319 kilogrammes, avec la vapeur et 125 kilogrammes avec l'air, pour les combustions de 200 kilogrammes environ. Le jet de vapeur consommerait ainsi 2,5 fois plus de travail ou de vapeur.

Le résultat obtenu dans les essais du *Fulminant* en 1881, combustion de 134,65 kilogrammes de charbon pour un travail de $1^{ch},45$ de la machine soufflante, par mètre carré de grilles, a concordé avec les expériences de la *Résolue*.

Dans la comparaison de l'effet des jets d'air et des jets de vapeur, il ne faut pas perdre de vue que l'emploi de la vapeur exige une dépense de charbon, qui double à peu près la consommation, pour réparation de la perte d'eau douce.

On a essayé de traiter, par le calcul, l'action des jets d'air et de vapeur pour activer le tirage, en appliquant à la colonne gazeuse le principe de la conservation du mouvement du centre de gravité :

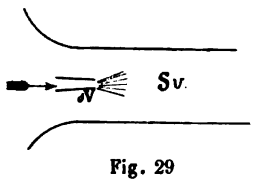


Fig. 29

$$\Sigma m\,dv = o,$$

qui suppose constamment nulle la somme des projections des forces extérieures, pressions et résistances, sur l'axe des vitesses considérées.

Dans ces conditions, soit m la masse d'air lancée à la vitesse V par une buse de section s, et soit M la masse d'air totale lancée ou entraînée, sortant à la vitesse v par un canal de section S; si la vitesse initiale de l'air entraîné est nulle, on aura :

$$Mv = m\,V.$$

Or on a :

$$M = S\delta v, \text{ et } m = s\,\delta\,V,$$

δ et δ_1 étant les densités des gaz passant en S et en s; de là :

$$S\delta\,v^2 = s\,\delta_1\,V^2. \tag{5}$$

Si l'on appelle H la pression produisant la vitesse V, et h celle qui produirait v et qui serait ici le tirage, la formule précédente peut s'écrire :

$$S\delta h = s\,\delta_1\,H \tag{6}$$

M. de Maupeou, dans des expériences faites sur la *Bièvre*, en lançant dans la cheminée des jets d'air, de section s variable, et de pression H

constante et égale à 274 millimètres d'eau, a trouvé, entre Sh et sH, un rapport constant, mais très différent de l'unité, savoir :

$$\frac{Sh}{sH} = 6{,}7. \tag{7}$$

Ces calculs sont évidemment sans valeur théorique; ils sont tout au plus propres à faire comprendre l'influence du rapport des densités δ et δ_1 et celle du rapport des vitesses V et v, sur le rendement mécanique d'une soufflerie.

Supposons maintenant que l'on dispose d'un travail moteur constant T, avec lequel on comprime l'air des jets à des pressions variables; on aura :

$$\frac{m V^2}{2} = T; \tag{8}$$

supposons de plus que l'on veuille choisir V, de manière à rendre maximum la quantité de mouvement abandonnée par les jets, et égale à,

$$m(V - v) = mV - mv = mV - mV\frac{v}{V}.$$

Remplaçons mV par $\frac{2T}{V}$; l'expression précédente devient

$$\frac{2T}{V} - \frac{2T}{V^2}v. \tag{9}$$

En différentiant par rapport à V, on voit que le maximum cherché correspond à la condition

$$-V^{-2} + 2vV^{-3} = 0,$$

ou, en écartant la solution $V = \infty$, à la condition

$$V = 2v. \tag{10}$$

Une valeur de V aussi faible exigerait des diamètres de buses et de conduits d'air comprimé tout à fait exagérés; l'expérience indique, du reste, qu'il faut donner à V des valeurs assez fortes, supérieures à celles que l'on peut obtenir avec un simple ventilateur. On obtient des rendements mécaniques convenables avec des ventilateurs doubles, ou, mieux encore, avec des machines soufflantes, à des pressions que j'avais estimées autrefois à 1 mètre d'eau environ, et qu'il appartient à l'expérience de déterminer exactement.

39. — *Ventilateurs centrifuges dans la cheminée.* — L'avantage considérable, qui existe au point de vue du service, à agir uniquement dans la cheminée pour activer le tirage, sans rien changer à la chambre

de chauffe et aux conditions ordinaires du travail des chauffeurs, fut mal apprécié en 1876. L'emploi des jets d'air fut rejeté pour le *Sfax*, où les chaudières ne devaient cependant brûler que 140 kilogrammes par mètre carré de grilles et ne brûlèrent même jamais plus de 116 kilogrammes de charbon. La faveur accordée au tirage forcé en chambre close, à la suite du succès des premiers torpilleurs de M. Thornycroft, fut longtemps exclusive. Il fallut une expérience prolongée, pour établir que ce système ne peut pas être appliqué aux grands navires munis de chaudières tubulaires, avec toute l'intensité qui constitue sa valeur, et que, réduit aux limites permises, il ne paie plus pour la gêne qu'il introduit dans le service. On tend à revenir aux chambres de chauffe ouvertes, ce qui ramène après vingt ans, aux moyens moins énergiques, mais plus pratiques, pour lesquels on a trouvé le nom nouveau de *tirage induit*.

En attendant le retour possible aux jets d'air, on emploie surtout le ventilateur centrifuge, placé à la base de la cheminée et aspirant dans les boîtes à fumée. Cette disposition, déjà proposée autrefois par Stevens, fut sérieusement essayée en 1876, sur le *La Bourdonnais*, par M. de Maupeou qui ne connaissait pas les études de Stevens.

M. de Maupeou essaya simultanément, sur la *Bièvre*, le ventilateur et les jets d'air comprimé ; il compara les deux systèmes, en mesurant le travail par mètre carré de grilles nécessaire dans chacun d'eux, pour obtenir une même dépression dans la cheminée ; il trouva les résultats inscrits plus loin, au tableau de la page 88, d'après lesquels les jets d'air ont consommé moins de travail sur la *Bièvre* que sur la *Résolue*, à dépression égale produite.

Moins économiques que le ventilateur, pour les dépressions de 15 millimètres et au-dessus, les jets d'air ont l'avantage au-dessous de 15 millimètres, d'après les expériences de la *Bièvre*. Il est probable que le ventilateur prend une supériorité marquée sur les jets, à tous les tirages, quand on lance de l'air comprimé à des pressions élevées, à une ou plusieurs atmosphères, comme on l'a fait récemment pour diminuer le poids et l'encombrement de la machine soufflante. Dans ces conditions, en effet, le tirage par les jets d'air s'est montré très coûteux, sur le *Léger*, le *Lévrier*, et divers bâtiments munis de chaudières Belleville.

Dans des expériences sur le *La Bourdonnais*, M. de Maupeou vérifia l'inefficacité des ventilateurs à hélice placés dans la cheminée. Enfin il essaya le tirage par refoulement en chambre close qu'il trouva supérieur, comme économie, aux systèmes par succion de la cheminée.

40. — *Tirage forcé en chambre close. Application aux torpilleurs.* — Le système de tirage forcé en chambre close, ou, comme on dit usuel-

lement, *en vase clos*, consiste à faire refouler par un ventilateur dans la chambre des chaudières, qui a été hermétiquement fermée et qui ne laisse à l'air refoulé d'autre issue que les grilles avec les conduits de flamme et de fumée qui y font suite. Déjà essayé par Stevens en 1846, appliqué un peu plus tard par une compagnie hollandaise de navigation de rivière, adopté par M. Isherwood sur ses canonnières, ce système a été définitivement introduit dans la marine par M. Thornycroft, lors de l'invention des torpilleurs.

Pour la puissance qu'il s'agit de tirer des chaudières de torpilleurs, il faut des tirages bien autres que ceux des expériences de la *Résolue* qui n'ont jamais dépassé 17 à 18 millimètres d'eau pour des combustions atteignant au plus 200 kilogrammes. Dès le début, M. Thornycroft visa aux résultats des locomotives, qui brûlent 800, 900 et jusqu'à 1100 kilogrammes de charbon par mètre carré de grilles avec des tirages pouvant s'élever à 250 millimètres d'eau. Adoptant une chaudière de modèle analogue, il refoula l'air, avec son ventilateur, à des pressions qui atteignirent 175 et même 200 millimètres d'eau. Il y avait là un excès évident. Le système du vase clos ne possède, en rien, la propriété précieuse du tirage par émission des locomotives combiné avec l'effet de la vitesse du train sur l'entrée d'air dans le cendrier, qui se moule sur le fonctionnement de la machine principale, et fournit la vapeur à proportion de ce qui se consomme. Le défaut de hauteur ne permettait pas non plus, sur les torpilleurs, l'adoption des foyers profonds et des épaisseurs de combustible en rapport avec les tirages puissants des locomotives. L'ouragan, qui balayait la couche trop mince de charbon, refroidissait la flamme et emportait, au lieu d'escarbilles, des morceaux de charbon incandescents. Plus le courant d'air était violent, plus on avait la satisfaction d'enfourner le charbon sans compter; mais on a dû souvent dépasser le tirage limite correspondant au maximum de vaporisation. Il reste peu de données sur le travail des ventilateurs à cette époque; on paraît avoir atteint et même dépassé 20 chevaux indiqués, par mètre carré de grilles.

La réaction contre le surmenage des chaudières de torpilleurs a été lente à se produire. On a brûlé encore 600 kilogrammes de charbon par heure et mètre carré de grilles sur le *Téméraire*, 637 kilogrammes sur le *Défi*, 752 kilogrammes sur l'*Alarme*, avec des consommations atteignant 2k,1 par cheval, presque la consommation des machines sans condensation des locomotives. Le chiffre excessif de la consommation était, du reste, le moindre inconvénient de ces allures désordonnées; le principal était dans les avaries fréquentes en marche, surtout au joint des tubes et des plaques de tête, et dans l'usure rapide résultant de la fatigue

de tout l'appareil. Enfin, le recrutement des chauffeurs de la flotte ne fournit pas d'hommes capables de conduire la chauffe, avec les chargements répétés qu'exigent de semblables combustions. La modération s'est donc imposée. Sur les 15 torpilleurs de 53 tonneaux, munis de chaudières genre locomotives, essayés en 1890-91, on n'a pas dépassé la combustion de 350 kilogrammes par heure, avec des pressions atteignant encore jusqu'à 150 millimètres; sur les six de ces torpilleurs fournis par M. Normand, la combustion maximum aux essais est restée comprise entre 306 et 260 kilogrammes, avec des pressions d'air de 100 millimètres au plus. Dans ces conditions, la combustion de charbon par cheval n'a plus été que de 1 kilogramme et parfois de $0^{k},9$; le travail des ventilateurs était d'environ 12 chevaux par mètre carré de grilles.

La combustion de 350 kilogrammes est la limite adoptée sur les nouveaux torpilleurs munis de chaudières tubuleuses système Du Temple ou analogues; cette combustion, en tenant la couche de charbon plus mince qu'autrefois, est obtenue avec des pressions d'air inférieures ou peu supérieures à 50 millimètres, sauf pour le *Forban*, sur lequel on est revenu aux pressions supérieures à 100 millimètres.

		PRESSION du vent	COMBUSTION	CONSOMMATION par cheval
Flibustier.	Essai à 14 nœuds. .	$6^{mm},9$	$75^{k},8$	$0^{k},526$
	— à toute vitesse .	$53^{mm},4$	$309^{k},7$	$0^{k},714$
Ariel . .	Essai à 14 nœuds .	»	$34^{k},7$	$0^{k},483$
	— à toute vitesse.	$32^{mm},0$	$348^{k},4$	$0^{k},805$
Forban .	Essai à 14 nœuds. .	»	$34^{k},48$	$0^{k},383$
	— à toute vitesse .	$120^{mm},0$	$312^{k},19$	$0^{k},610$

41. — *Tirage forcé en chambre close sur les grands navires.* — Dès l'apparition des premiers torpilleurs, le succès du tirage forcé en chambre close fit immédiatement proposer en France une application générale, permettant d'accroître la puissance des chaudières existantes, et de réduire, d'environ moitié, le poids des chaudières sur les nouveaux navires à construire. M. de Maupeou, qui prit une grande part au mouvement, commença par étudier comparativement, ainsi que nous l'avons vu, tous les systèmes proposés; il trouva, en faveur du vase clos, un avantage d'économie marqué, même par rapport au ventilateur centri-

fuge aspirant dans la cheminée, comme l'indique le tableau suivant, extrait de ses rapports.

SYSTÈMES DET IRAGE	TRAVAIL EN CHEVAUX PAR MQ. DE GRILLES pour obtenir des pressions en m/m. d'eau de :			
	15	20	25	30
	ch.	ch.	ch.	ch
Soufflerie en vase clos.	1,0	2,5	2,2	3,0
Jets d'air dans la cheminée . . .	1,4	3,5	5,6	8,0
Ventilateur centrifuge aspirant .	2,0	3,2	4,0	5,7

A la suite de ces essais. le système du vase clos fut définitivement installé sur le *La Bourdonnais* dès 1876, puis successivement sur plusieurs autres croiseurs. La marine anglaise ne se laissa entraîner qu'en 1882, époque des applications faites pour la première fois par l'Amirauté à bord du *Conqueror* et du *Satellite.*

Les auteurs de nouveaux navires n'acceptèrent d'abord qu'avec prudence le moyen d'alléger les chaudières qui se présentait. Ainsi qu'il a été dit plus haut, le *Sfax*, étudié pour une combustion de 140 kilogrammes, n'en brûle, en réalité que 116 par mètre carré de grilles; sur le *Tage*, on ne dépasse pas 146 kilogrammes. On opérait alors sur les chaudières cylindriques du vieux modèle à retour de flamme, d'une construction solide et d'une disposition favorable à la bonne utilisation de la chaleur. Les essais furent encourageants. On n'objectait guère que la complication introduite dans le service, en fermant toutes les issues par des doubles portes, et l'anxiété qui troublait les chauffeurs peu aguerris, dans la chambre hermétiquement close.

On s'enhardit alors à pousser la combustion jusqu'au chiffre de 250 kilogrammes. En même temps, on abandonna les chaudières à retour de flamme pour le modèle cylindrique à tubes directs qui est exposé à beaucoup plus d'avaries, même au tirage ordinaire, et qui est infiniment moins propre à supporter les grandes activités de combustion. A cette période, se rattachent les essais des grands cuirassés, *Hoche*, *Marceau*, *Magenta*, sur lesquels on brûla 240 kilogrammes de charbon, en faisant développer aux ventilateurs 3 chevaux par mètre carré de grilles, puis ceux des canonnières type *Grenade*, dans lesquels on brûla 251 kilogr. en développant 2 ch.,6, et surtout ceux des petits croiseurs, type *Forbin*, sur lesquels on poussa la combustion à 324 kilogrammes au prix

d'avaries répétées qui amenaient la destruction rapide des chaudières.

Comme exemple de bâtiments ayant tiré du vase clos de sérieux résultats, sans trop d'avaries dans les essais, on peut citer les trois croiseurs, *Troude, Lalande, Cosmao.* Les données relatives à leurs essais sont les suivantes, en calculant le travail des ventilateurs, d'après leur vitesse de 350 tours et l'ordonnée sur leurs pistons évaluée à 4 kilogrammes.

	TRAVAIL des ventilateurs par mq. de grilles	PRESSION dans la chaufferie	DÉPRESSION dans la boîte à fumée	TIRAGE total	COMBUSTION par mq. de grilles
Troude. .	4 ch.	33 mm.	11 mm.	44 mm.	285k,0
Lalande .	4 »	31 »	11 »	42 »	284 ,3
Cosmao	4 »	26 »	12,5	38,5	257 ,1
Moyennes	4 ch.	30 mm.	11,5	41,5	275k,5

Le bénéfice réalisé au point de vue de la puissance et de la vitesse fut le suivant :

	TIRAGE NATUREL				TIRAGE FORCÉ			
	F	V	M	C	F	V	M	C
Troude . .	3484 ch.	17m,565	3,678	0k,880	6435 ch.	20m,913	3,578	1k,276
Lalande . .	3715 »	17 ,310	3,548	0 ,849	6532 »	20 ,687	3,510	1 ,309
Cosmao . .	3643 »	17 ,375	3,581	0 ,854	6385 »	20 ,603	3,525	1 ,182
Moyennes .	3614 ch.	17m,417	3,599	0k,861	6450 ch.	20m,734	3,534	1k,255

Ainsi la vitesse était accrue d'un peu moins du cinquième, et la consommation de charbon par cheval accrue de moitié.

Vers la même époque, dans les essais du *Yayéyama* en février 1891 le tirage forcé faisait passer la vitesse de 18n,4 à 20n,9 et aurait permis

de dépasser cette vitesse, si la crainte d'avaries aux chaudières n'avait empêché de lancer les ventilateurs à toute vitesse.

Le tirage forcé en chambre close reçut alors une application très étendue dans toutes les marines, jusqu'au moment où la pratique de la navigation vint contredire les espérances données par les essais.

Déjà les essais avaient mis en lumière un inconvénient sérieux du tirage forcé, l'accroissement de la consommation de charbon par cheval, sur les chaudières mal appropriées à ce tirage. Une augmentation de dépense dans le rapport 1, 5, suffit en effet à rendre le tirage forcé inacceptable en pratique, sur des bâtiments pauvrement approvisionnés en combustible. Sous le rapport du fonctionnement des chaudières, on rencontra une véritable déception ; les avaries, surtout les décollements de tubes au joint sur les plaques de tête et les affaissements de foyers, se multiplièrent de la manière la plus inquiétante. Ces dangers n'étaient nullement compensés par l'augmentation de puissance, que l'on avait prévue, mais que les chauffeurs ordinaires se trouvaient incapables de réaliser. Il ne restait plus d'autre résultat bien saillant que la complication introduite dans le service par la fermuture hermétique, avec sas et doubles portes, de toute la chambre de chauffe. On comprend facilement l'amertume, avec laquelle le tirage forcé en vase clos a été qualifié alors d'*invention diabolique*.

Aujourd'hui, par l'effet d'une réaction excessive, on a limité aux torpilleurs l'emploi des tirages forcés énergiques, et on a fixé à 150 kilogrammes environ, pour les grands navires, cuirassés ou croiseurs, la combustion maximum sur les grilles. Il est résulté de là une perte sur la vitesse prévue, qui a dépassé 1 nœud sur les grands croiseurs anglais *Blake* et *Blenheim*, tandis qu'en France, pour conserver aux appareils leur puissance pour les poids prévus, ou leur poids pour une puissance prévue, on prenait dès 1892, la mesure radicale d'abandonner les chaudières tubulaires, avant d'avoir pu déterminer exactement par quel modèle tubuleux on les remplacerait.

La marine de guerre française fait aujourd'hui un très grand usage des chaudières tubuleuses à circulation limitée ou à circulation libre, qui, en raison de la disposition même de leurs foyers et de leurs tubes d'eau ne sont pas considérées comme propres à l'emploi des grands tirages forcés. Les chaudières tubuleuses à circulation accélérée, qui sont au contraire capables d'utiliser économiquement de très forts tirages, sont restées jusqu'en 1895 à peu près confinées sur les torpilleurs. Si ces dernières chaudières donnent des preuves d'une endurance suffisante pour être adoptées sur les grands navires, elles pourront résoudre

à la fois les deux problèmes de la légèreté des appareils et de l'emploi du tirage forcé; mais il sera prudent de modérer d'abord le tirage.

La marine de commerce, qui reste fidèle aux chaudières tubulaires, type marin, fait connaissance, à son tour, avec le tirage forcé. Elle modifie les conditions du problème, en recherchant l'économie de combustible, plus encore que la légèreté des appareils, et surtout en rejetant absolument les complications du service résultant de la fermeture de la chambre de chauffe.

42. — *Tirage forcé en cendrier clos.* — Le système de tirage forcé, généralement préféré aujourd'hui dans la marine de commerce, est celui du refoulement en cendrier clos, dans lequel les ventilateurs refoulants, au lieu d'envoyer l'air dans la chambre close, le conduisent directement sous la grille des foyers.

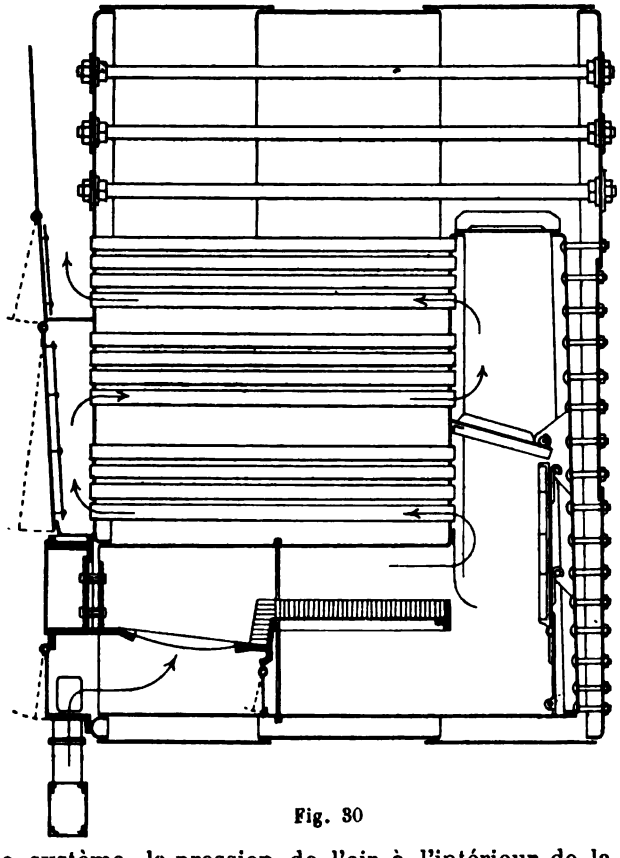


Fig. 30

Dans ce système, la pression de l'air à l'intérieur de la chaudière, étant plus élevée que dans la chambre de chauffe, il faut nécessairement

pour faire pénétrer de l'air à travers les portes de foyers, que ces portes se trouvent entourées extérieurement par le canal de refoulement des ventilateurs. De plus, pour éviter les projections de flamme à l'extérieur, il faut que le tirage forcé s'interrompe, chaque fois qu'une porte de foyer est ouverte. Il convient aussi d'arrêter l'arrivée d'air sous pression, quand on ouvre les portes de cendriers, mais ceci seulement pour éviter les pertes d'air et un souffle gênant. La fermeture des conduits d'air se fait en général automatiquement, quand les portes de foyers s'ouvrent.

Le système du cendrier clos a été inauguré autrefois, sur les transatlantiques, par M. Audenet, qui visait moins à accroître la puissance des chaudières que leur rendement. La surface de grilles était réduite dans la proportion de moitié environ, suivant laquelle l'activité de la combustion était accrue ; la quantité d'air insufflée par kilogramme de charbon était les deux tiers seulement de celle nécessaire avec le tirage naturel. Toute la partie arrière des foyers devenait une chambre de combustion. Les gaz chauds exécutaient, dans le faisceau de tubes, trois parcours successifs complets à travers l'eau ; la boîte à feu et la boîte à fumée étaient, à cet effet, divisées chacune en deux parties par des tôles horizontales, comme on le voit sur la figure 30. L'accroissement de résistance au passage de l'air dans le faisceau tubulaire, joint à l'activité de combustion nécessaire en raison de la réduction de la grille, exigeait un tirage forcé énergique.

La disposition Audenet a été abandonnée par son auteur. Le successeur de M. Audenet, M. Daymard, a fait sur la *Touraine* l'essai du système du cendrier clos, sans réduction de la surface de grille ni allongement du parcours des gaz, dans le but unique d'obtenir un accroissement de puissance. Il a rencontré les inconvénients inhérents à tous les tirages forcés énergiques ; les chaudières de la *Touraine* n'ont pas pu supporter, sans inconvénients, pendant toute la durée d'une traversée transatlantique, la chauffe très active à laquelle elles étaient soumises ; les suintements d'eau amenaient des agglomérations de suie et d'escarbilles, connues sous le nom de *nids de pie*, qui obstruaient l'entrée des tubes. Il a fallu revenir au tirage naturel.

Le système du cendrier clos fonctionne très bien sur les *ferry-boats* américains de l'Hudson, qui n'ont à faire que des traversées beaucoup plus courtes que celles des transatlantiques. On se contente, du reste, d'un tirage assez modéré, limité à ce qu'exige la bonne combustion des anthracites américains.

§ 5. — Du tirage forcé appliqué à l'accroissement de l'utilisation de la chaleur.

43. — *Source d'économie de chaleur dans le tirage forcé.* — Le tirage naturel, considéré comme moyen d'imprimer à la colonne gazeuse le mouvement nécessaire pour produire la combustion, constitue un moteur très peu économique. Supposons les gaz évacués à 300° seulement, la perte de chaleur est de 1.447 calories par kilogramme de charbon, non compris la chaleur latente de la vapeur d'eau contenue dans la fumée; le seul résultat obtenu est une vitesse de 10 mètres par seconde, au grand maximum, imprimée à un poids de gaz, de 19 kilogrammes d'air plus 1 kilogramme de charbon, soit 20 kilogrammes en tout ; la force vive correspondante est

$$\frac{1}{2} \times \frac{20}{9,8} \times 10^{2} = 102 \text{ kilogrammètres.}$$

C'est un travail de 0,0004 chevaux pour une dépense de chaleur correspondant à $0^{k},16$ de charbon par heure; le rendement mécanique est donc extrêmement faible, presque nul, et tout ce qui peut s'utiliser autrement, des 18,9 % de la chaleur totale perdus à produire le tirage naturel, constitue sensiblement un bénéfice net.

La chaleur des gaz peut être utilisée de quatre manières différentes :

1° En augmentant le trajet à travers la masse liquide;

2° En surchauffant la vapeur produite, à l'aide d'un appareil spécial juxtaposé à la chaudière proprement dite;

3° En réchauffant l'eau d'alimentation;

4° En réchauffant l'air destiné à la combustion.

L'eau des chaudières, ou la vapeur produite, ne peuvent pas servir à refroidir les gaz beaucoup au-dessous de 300 degrés, à travers une tôle, puisque leur température atteint 200 degrés aux pressions actuellement adoptées. Les diverses tentatives faites pour surchauffer la vapeur ont d'ailleurs toujours échoué, même à l'époque où la vapeur n'était qu'à 120 degrés, sans doute à cause de la mauvaise conductibilité de la vapeur sèche.

Le procédé de M. Audenet, pour augmenter la production de vapeur saturée, en allongeant le trajet des gaz dans la chaudière a été abandonné. Restent donc le réchauffage de l'eau et celui de l'air, qui, en principe, permettent de refroidir les gaz chauds jusqu'à une température voisine de celle de l'air ambiant, si l'on dirige les deux courants en sens inverse l'un de l'autre; les gaz chauds peuvent sortir, en effet, à la température d'entrée du corps refroidissant, tandis que l'eau ou l'air

réchauffés peuvent sortir à la température d'entrée des gaz chauds. Pour l'air, le principe est sans restrictions; pour l'eau, on rencontre en pratique la convenance de ne pas commencer la vaporisation, qui pourrait contrarier le mouvement dans le surchauffeur d'eau.

44.— *Réchauffage de l'eau d'alimentation.* — Le poids de l'eau évaporée dans une bonne chaudière est, en nombres ronds, égal à la moitié du poids des gaz de la combustion; la chaleur spécifique de l'eau est à peu près le quadruple de celle de ces gaz. Dans un appareil de réchauffage parfaitement isolé, l'élévation de température de l'eau serait donc égale à la moitié de l'abaissement de température des gaz. Ce raisonnement élémentaire suffit à montrer que le réchauffage de l'eau d'alimentation fournit un moyen suffisant d'utiliser toute la chaleur dont les gaz peuvent être dépouillés, du moins avec les hautes pressions actuelles, qui permettent de disposer pour l'eau d'un écart de température de 150 degrés et au delà. Rien, en principe, n'empêche de refroidir la fumée au-dessous de 100 degrés et d'en condenser ainsi la vapeur.

Les essais de réchauffage d'eau d'alimentation par la fumée ont été nombreux; quelques chaudières tubuleuses récentes, les chaudières Oriolle, Towne, Babcock etc., portent même, comme partie intégrante, un serpentin pour ce réchauffage; la première chaudière Belleville avait un réchauffeur d'eau, la plus récente en possède un très développé. En général, on s'est contenté d'appareils de dimensions restreintes, de faible efficacité, n'exigeant nullement le tirage forcé; quand la température de l'eau y reste au-dessous de 100 degrés, et que l'appareil n'a pas à subir de pression intérieure, sa construction devient très simple. Le réchauffage, même imparfait, donne une économie sensible, parce qu'il améliore le fonctionnement des chaudières, en hâtant la formation des bulles de vapeur, et favorisant ainsi la circulation de l'eau.

Les applications les plus nombreuses et les plus variées du réchauffage de l'eau par la fumée, sont celles essayées par Ebenezer Kemp, de Glasgow; elles comprennent, les unes, le réchauffage partiel, et les autres, le réchauffage complet.

De 1879 à 1886 M. Kemp, construisant les chaudières de plusieurs paquebots de la ligne des « Clan » y établit de petits serpentins de chauffage d'eau d'une surface égale au dixième de la surface de chauffe des chaudières. Le refroidissement des gaz était faible et ne modifiait pas le tirage naturel seul employé. L'échauffement de l'eau, compris entre 20 et 25 degrés, payait mal la dépense.

En 1886, sur le *Bléville*, construit pour un armateur du Havre, Kemp

aborda sérieusement le problème du refroidissement de la fumée; il donna aux réchauffeurs d'eau, disposés comme de petites chaudières tubuleuses, une surface double de la surface de chauffe des chaudières, et il disposa un appareil de tirage forcé composé d'un ventilateur aspirant à la base de la cheminée.

La marche au tirage forcé a été simplement essayée dans le port à Glasgow. On mesura un refroidissement de la fumée de

$$560^\circ - 180^\circ = 380^\circ,$$

et un réchauffement de l'eau de

$$182 - 49^\circ = 133^\circ.$$

La fumée était donc prise à une température très élevée, et évacuée à 131 degrés au-dessus de la température de l'eau à son entrée. On enlevait 1824 calories à la fumée par kilogramme de charbon brûlé ($20 \times 380 \times 0{,}24 = 1824$); on en récupérait 1330 au maximum; 594 calories étaient perdues, par rayonnement ou par conductibilité, dans le réchauffeur.

Le fonctionnement au tirage naturel fut éprouvé dans le port et à la mer, avec la machine en marche.

Dans le port, on constata une consommation de charbon de $0^k,53$ par cheval, avec une combustion de $72^k,7$ par mètre carré de grilles, ce qui était un beau résultat pour une machine à triple expansion marchant à $11^k,25$ de pression. La fumée était produite à 340 degrés et refroidie à 150 degrés.

A la mer, dans une traversée de Glasgow au Havre, la consommation ne descendit pas au-dessous de $0^k,63$. L'essai, du reste, fut bientôt abandonné; les tubes du réchauffeur se perçaient fréquemment et parfois se fendaient à leur emmanchement, par suite de la formation de chambres de vapeur. On débarqua les réchauffeurs d'abord, et plus tard les chaudières jugées insuffisantes, et l'on installa des chaudières plus grandes, présentant le poids des premières et de leurs réchauffeurs.

M. Kemp adopta alors une nouvelle disposition. Sur le *Caloric*, essayé en 1888, le tirage forcé est obtenu par refoulement dans les cendriers. Les réchauffeurs forment quatre petites chaudières cylindriques pleines d'eau, avec tubes traversés par la fumée. La fumée fait deux parcours complets, traversant d'abord le groupe inférieur de réchauffeurs, et ensuite le groupe supérieur; elle arrive à la température de 360 degrés, perd 130 degrés dans le premier groupe, 115 degrés dans le second, et sort à 115 degrés. L'eau traverse, au contraire, les quatre réchauffeurs

successivement en élevant sa température de 20 degrés environ dans chacun d'eux (fig. 31).

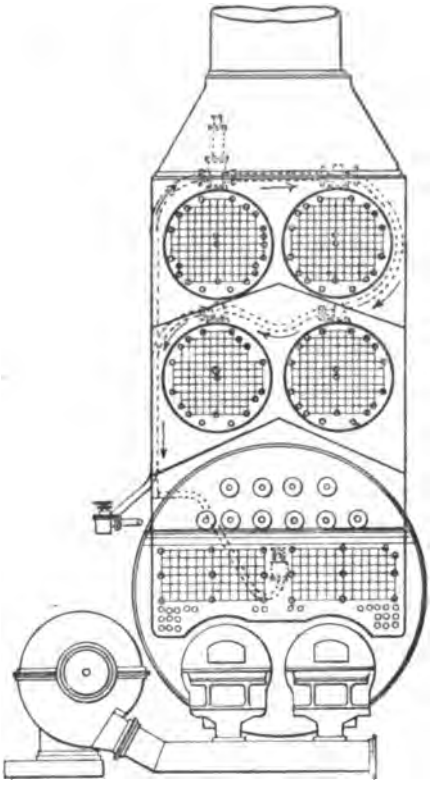


Fig. 31

On trouve ainsi, en faisant toujours les mêmes suppositions sur le poids de l'eau et des gaz, que la fumée perd par kilogramme de charbon brûlé, 1176 calories dont 800 utilisées par l'eau, les 376 autres étant perdues par rayonnement.

La surface du réchauffeur est relativement un peu plus forte sur le *Caloric* que sur le *Bléville*, et la surface de chauffe de la chaudière elle-même est surtout plus grande; les données principales pour les deux appareils, ainsi que les résultats des essais faits dans le port, sont résumés dans le tableau suivant.

	SURFACE de grille G	SURFACE de CHAUFFE		RAPPORTS		REFROIDISSEMENT de la fumée ΔT	RÉCHAUFFEMENT de l'eau Δt
		Chaudières S	réchauffeurs S'	$\frac{S}{G}$	$\frac{S'}{S}$		
Caloric .	3^{m2}, 576	149^{m1}, 78	325^{m2}	42	2,17	245°	80°
Bléville .	6, 688	164, 25	315	25	1,91	220	85

L'appareil du *Caloric* a subi l'épreuve d'un service actif, dans lequel le navire faisait un parcours annuel de 38.000 à 40.000 milles; la consommation par cheval et par heure était de $0^{k},57$; la consommation journalière était de 9 tonneaux, alors qu'elle atteignait 11 tonneaux sur les navires de la même ligne dépourvus de réchauffeurs, soit 18 % environ d'économie. Le fonctionnement parait avoir été bon. On a signalé au

début quelques corrosions de tubes à l'arrivée de l'eau d'alimentation, ce qui n'avait rien de surprenant puisqu'à cette époque on n'épurait pas les eaux, qu'on ne les neutralisait pas avec un alcali, et que les cylindres à vapeur avaient un graissage d'huile minérale pour l'intérieur et de suif pour les presse-étoupes. Les corrosions aux tubes des surchauffeurs évitaient d'ailleurs des corrosions aux tubes de la chaudière proprement dite.

Le poids des surchauffeurs du *Caloric* ne doit pas avoir été de moins de 280 kilogrammes par mètre carré de surface de grilles, soit environ le cinquième du poids des chaudières.

Depuis la retraite de Kemp, en 1890, suivie bientôt de sa mort, l'application de son système paraît interrompue, et la vogue a été plutôt au réchauffage de l'eau par la vapeur. Cependant on semble revenir au réchauffage de l'eau d'alimentation par les gaz chauds. Sur les chaudières Belleville, par exemple, on dispose aujourd'hui des réchauffeurs construits de la même façon que la chaudière et placés dans une vaste culotte de cheminée ; on enlève les deux rangées supérieures de tubes des chaudières proprement dites pour réduire le poids ; un appareil de 36 mètres carrés de surface de grilles n'a à subir qu'une surcharge de 6 tonneaux environ. Les surfaces de chauffe sont proportionnées de la manière suivante :

Surface de grilles	$36^{mq}.70$
Surface de chauffe (production de vapeur)	851
Surface de réchauffage d'alimentation.	405

Ce système, qui doit être mis à l'essai dans la marine anglaise, a été adopté sur deux paquebots de la Compagnie des Messageries maritimes ; on compte sur une économie de charbon de 20 % d'après les essais faits à terre.

45. — *Réchauffage de l'air de la combustion. Compétition entre MM. J. Howden et Ellis.* — Quand on enlève de la chaleur à la fumée pour réchauffer l'air de la combustion, on emploie des appareils à tubes très minces, beaucoup plus légers que pour l'eau d'alimentation, puisqu'ils n'ont aucune pression à supporter. L'abaissement de la température des gaz et l'élévation de celle de l'air sont naturellement égaux entre eux, aux pertes du réchauffeur près. Comme rien ne limite d'ailleurs la température que l'on peut donner à l'air, le réchauffage de l'air permet, en principe, de refroidir complètement la fumée.

Il semblerait que l'air est infiniment moins propre que l'eau, en raison de sa faible conductibilité, à dépouiller la fumée de sa chaleur, ou, en d'autres termes, qu'il exige des réchauffeurs d'une surface beaucoup

plus grande. La pratique ne confirme pas cette supposition. On a obtenu pour l'air un réchauffage de 100 degrés, aussi facilement que pour l'eau un réchauffage de 80 degrés, avec des appareils de surface analogue. La mesure des températures des gaz chauds, dans des espaces soumis au rayonnement, présente, il est vrai, une grande incertitude, qui n'existe pas pour la mesure des températures de l'eau.

Les effets du réchauffage de l'air sont complexes, parce que, dans l'air chaud, la combustion du charbon est plus rapide et plus complète (1) que dans l'air froid. On a pu avancer, avec apparence de raison, qu'une élévation de 100° dans la température de l'air en donne une de 200° dans celle de la flamme, grâce à la perfection des combinaisons chimiques ; de plus, le raccourcissement de la flamme met à l'abri de son refroidissement prématuré avant l'arrivée dans les tubes.

L'étude du réchauffage de l'air est surtout l'œuvre de M. J. Howden, qui l'entreprit vers 1859, en empruntant d'abord la chaleur à la vapeur sortant des cylindres. Il y a, dans la condensation par l'eau froide, une perte de chaleur, qui est bien plus grande encore que la perte par la cheminée, et à laquelle on ne sait porter aucun remède jusqu'ici. M. Howden fit breveter en 1859 un condenseur, où l'air servait de matière réfrigérante à la vapeur évacuée. Cet appareil n'a pas eu d'applications dans la marine ; il mériterait peut-être un essai sur les locomotives, où l'on n'a pas d'eau pour effectuer la condensation.

M. J. Howden entreprit ensuite de refroidir la fumée au profit de l'air destiné aux foyers. Son appareil, essayé avec succès sur le paquebot *City of New-York*, donna dès le début des résultats encourageants.

Sur le *City of New-York*, l'élévation de température de l'air a été estimée par M. Howden à 102°. Sur l'*Indiana*, autre paquebot de l'*American line*, avec une surface réchauffante plus grande, l'élévation de température paraît voisine de 150° ; la température de sortie de la fumée est 235° ; le tirage forcé a une intensité permettant de développer 240 chevaux par mètre carré de grilles. Un appareil identique à celui de l'*Indiana* se trouve sur l'*Illinois* et le *Pensylvania*.

Escomptant ce succès pour les nouveaux paquebots de la ligne américaine, *Saint-Louis* et *Saint-Paul*, construits chez MM. Cramp, M. Howden a promis une consommation de 0k,55 seulement par cheval, pour une puissance développée de 240 chevaux par mètre carré de grilles.

Le dispositif de M. Howden a été adopté par la Compagnie *White star* sur le *Celtic*, le *Majestic*, le *Teutonic*, et par la Compagnie Cunard sur

1. La quantité de chaleur produite par la combustion diminue, d'autre part, quand la température s'élève ; elle s'annulerait à la température de dissociation des produits de la combustion.

le *Sylvania*. La Compagnie péninsulaire et orientale, la ligne *Allan*, la ligne des *Clan*, en ont aussi fait diverses applications.

La marine de guerre américaine, qui se sert du système en vase clos ordinaire, sans refroidissement de la fumée, sur tous ses grands croiseurs et ses cuirassés, adopte le système Howden sur ses petits bâtiments, *Détroit*, *Montgomery*, *Marblehead*, *Concord*, *Bennington*, *Bancroft*.

Le dispositif Howden, tel qu'il est installé sur l'*Indiana*, est représenté sur les fig. 32 et 32 *bis*. L'air est refoulé aux cendriers par un venti-

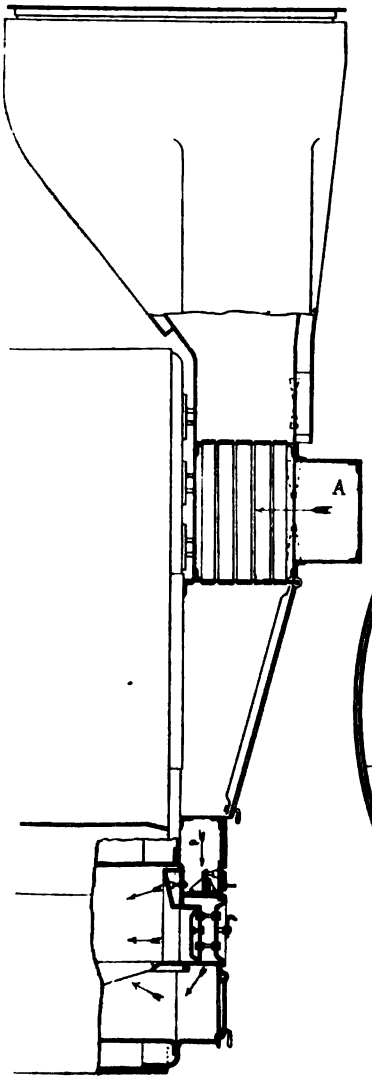


Fig. 32

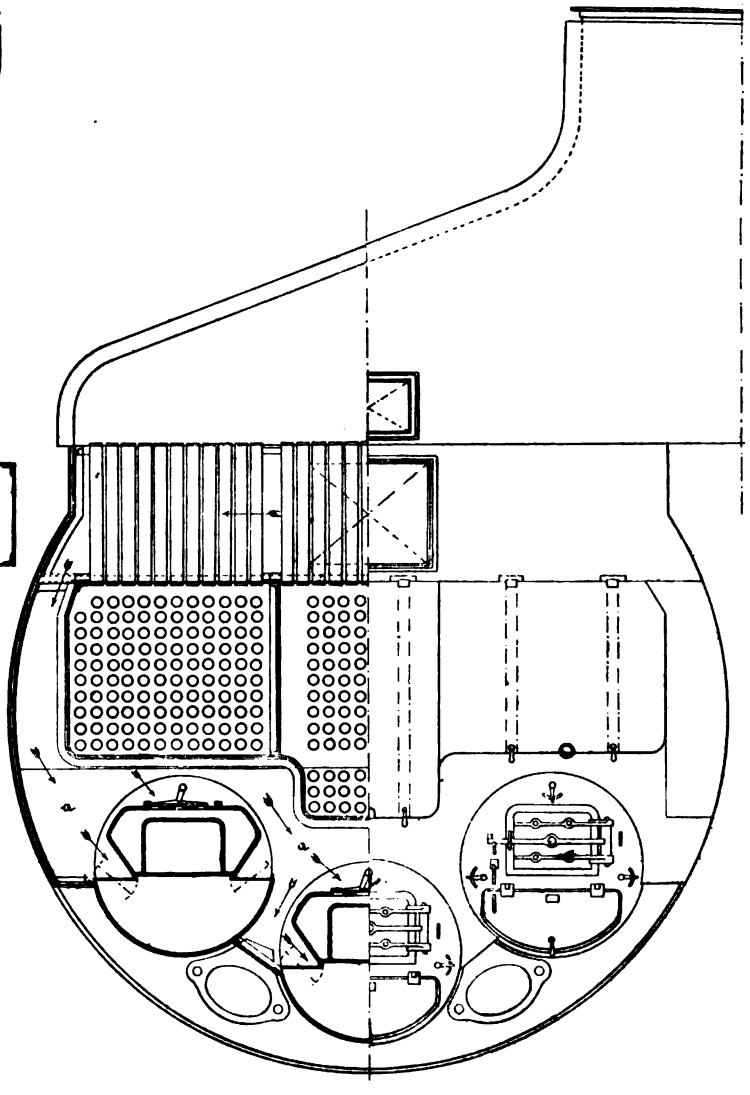


Fig. 32 *bis*

lateur, en traversant sur son parcours une caisse A, où il circule autour d'un faisceau de tubes verticaux dans lesquels passe la fumée. Le détail de l'arrivée de l'air dans les cendriers et sur les foyers, très bien étudié, mérite une attention spéciale.

L'air est fourni à chaque foyer par une boite *a a a* appliquée sur la façade de la chaudière, qui communique avec les canaux de refoulement d'air chaud par une ouverture unique munie d'un registre. De la chambre *a*, l'air entre directement dans le cendrier et dans les parties latérales du fourneau; il pénètre de plus dans le fourneau à travers la contre-porte percée de trous.

Avec le système Howden, lorsqu'on arrive aux combustions intenses, voisines de 300 kilogrammes, on a reconnu la nécessité de relever le plan des grilles dans le fond du foyer.

Le réchauffage de l'air n'exige pas le système de refoulement en cendrier clos; il est parfaitement compatible avec l'emploi du tirage forcé par aspiration dans la cheminée, ou tirage induit, qui devient alors un *tirage induit en cendrier clos*. Ce dernier dispositif, imaginé par MM. Ellis et Eaves de la maison Brown à Sheffield, fait une sérieuse concurrence à celui de M. Howden.

Essayé d'abord à terre sur les chaudières d'atelier de la maison Brown, le système Ellis a été adopté par la Compagnie Turnbull sur les paquebots *Perthshire*, *Buteshire*, *Banffshire*, et par la ligne américaine, sur le *Berlin*, le *Southwark*, le *Kensington;* on aura donc bientôt une comparaison directe, sur la même ligne, du dispositif Ellis et du dispositif Howden.

Le réchauffeur Ellis est placé sur le dessus de la chaudière et divisé en deux parties, séparées, sur la façade par le coffre à fumée, sur l'arrière, par la cheminée; la fumée qui passe à l'extérieur des tubes, y fait ainsi quatre coudes à angle droit; le parcours de l'air à réchauffer, avant l'arrivée au cendrier, est au contraire très simple. La distribution de l'air, dans le cendrier et dans le fourneau, a lieu comme dans le modèle Howden, sauf qu'on peut faire varier l'arrivée dans le fourneau par des registres indépendants, pour donner plus d'air au-dessus de la grille, ou au-dessous, selon la nature du charbon brûlé (fig. 33 et 33 *bis*).

L'avantage du modèle Ellis est dans la commodité habituelle du système aspirant, accrue ici de la suppression du danger de lancer des jets d'air brûlant dans la chambre de chauffe. La pression étant partout moindre dans les conduits d'air ou de fumée que dans la chambre de chauffe, les défauts d'étanchéité des joints sont sans inconvénient; on laisse même intentionnellement quelques ouvertures pour produire un appel dans la chambre de chauffe. On peut ouvrir les por-

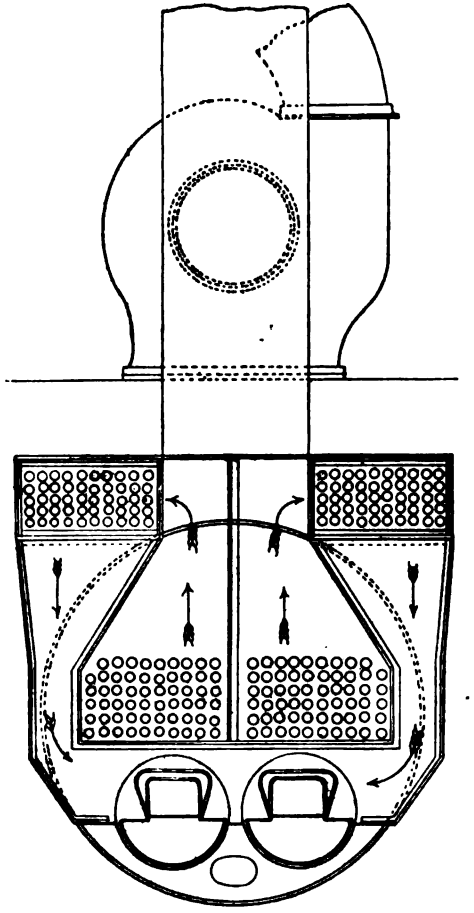


Fig. 33

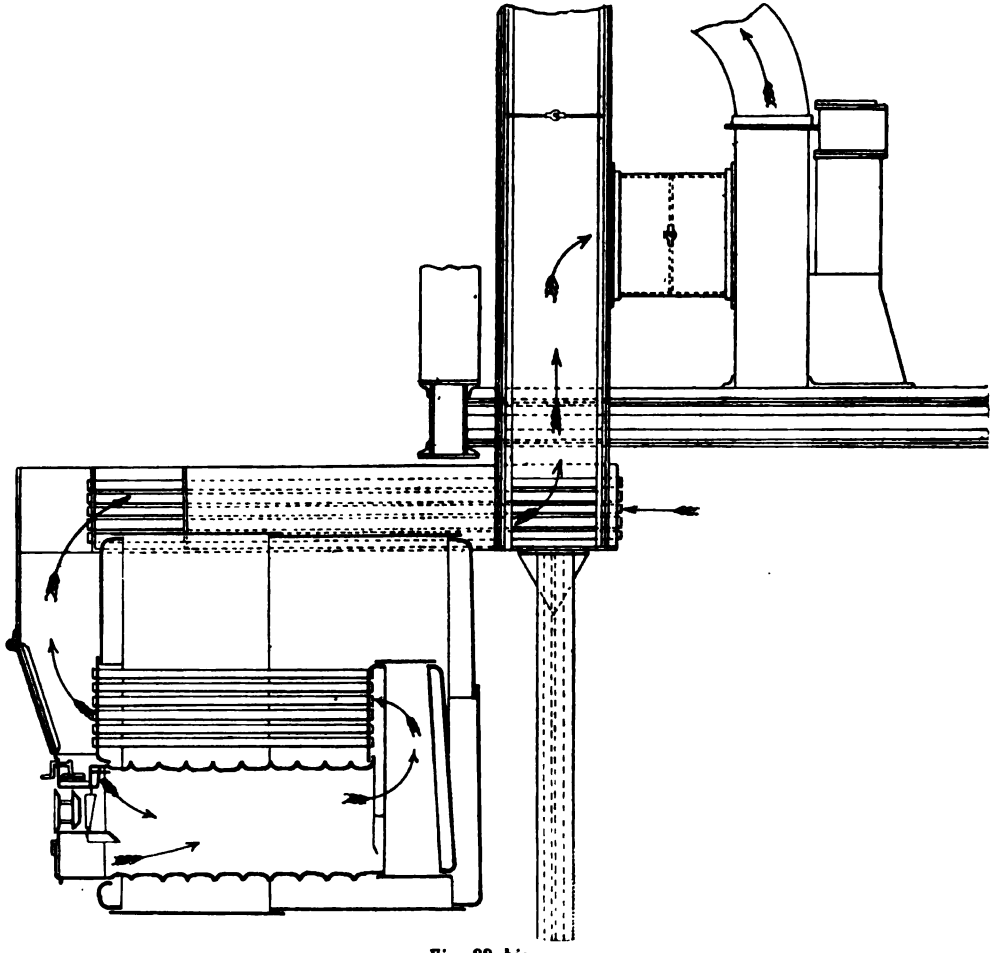


Fig. 33 *bis*

tes de foyers et de cendriers sans avoir de registre à manœuvrer; en les ouvrant, on accroît l'intensité de la combustion de manière à compenser l'abaissement de température de l'air introduit; le refroidissement de la chaudière n'est par suite pas très grand, du moins à ce qu'assurent les inventeurs, pendant le chargement du charbon (1).

Les inconvénients du système Ellis sont ceux du système aspirant en général, c'est-à-dire le moindre rendement du ventilateur, qui travaille sur des gaz dilatés, d'un poids spécifique inférieur à celui de l'air ambiant, malgré le refroidissement subi. L'air à réchauffer suit un parcours compliqué, avec neuf coudes à angle droit, amenant une perte de charge de 89 millimètres d'eau environ, avant l'arrivée aux grilles. La traversée des grilles faisant perdre 9 millimètres, et le parcours des gaz chauds jusqu'au ventilateur 14 millimètres, MM. Ellis et Eaves demandent au ventilateur de leurs chaudières d'atelier de produire une dépression totale de 112 millimètres d'eau, en lui faisant développer 3,3 chevaux par mètre carré de grilles. Chaque chaudière à deux foyers exige ainsi un ventilateur de 1^m,68 de diamètre. Les chaudières marines, avec des réchauffeurs sans doute mieux disposés, se contentent, il est vrai, de tirages moins énergiques, savoir: 88 millimètres sur le *Berlin*, 74 millimètres sur le *Southwark*, 44 millimètres seulement sur le *Perthshire*, Les dimensions des ventilateurs sont très grandes, 2^m,28 de diamètre sur le *Berlin*, 2^m,44 sur les paquebots Turnbull; il est clair que de semblables ventilateurs trouveraient difficilement place à la base de la cheminée des cuirassés.

Le *Perthshire* et le *Buteshire* ont fait plusieurs traversées sur la ligne d'Australie, en brûlant de 126 kilogrammes à 152 kilogrammes de charbon (en moyenne 139 kilogrammes) par mètre carré de grilles, et en consommant 0^k,61 de charbon en tout, par cheval des machines principales. Si l'on admet qu'avec le tirage forcé habituel en vase clos, sans réchauffage d'air, il faudrait consommer 0^k,70 par cheval pour obtenir 228 chevaux par mètre carré de grilles, le bénéfice réalisé par le réchauffage est de 15 % sur le combustible.

MM. Ellis et Eaves attribuent à l'emploi des tubes Serve une grosse part de l'économie obtenue.

Le poids des appareils de réchauffage n'a été donné, ni par M. Howden, ni par MM. Ellis et Eaves; j'ai calculé que, pour une surface ré-

1. On pourrait s'appuyer, à ce sujet, sur les résultats d'une comparaison faite à Brest, avec une chaudière, Godard entre le tirage en vase clos et le refoulement au cendrier. Avec le refoulement au cendrier, la pression baissait de 1 kilogramme pendant l'ouverture des portes; en vase clos, elle ne changeait pas. Au point de vue de l'affluence d'air au foyer, le système aspirant Ellis peut s'assimiler ici au cas du vase clos.

chauffante égale à 23 fois la surface de grilles, il pouvait être évalué à 0t,65 par mètre carré de grilles, les ventilateurs non compris.

D'après ce qui précède, le tirage forcé a été étudié et appliqué de deux manières toutes différentes, sur les navires de guerre, où l'on se préoccupe d'accroître le plus possible la puissance pendant un temps très court, et sur les paquebots où l'on se préoccupe d'obtenir la plus faible dépense de combustible possible, pendant une longue traversée. La différence entre les deux solutions, qui semble logique à première vue, se justifie beaucoup moins, quand on approfondit la question des économies de poids, et qu'on suppose les navires de guerre, de même que ceux de commerce, à l'abri des accidents qui ne sont produits que par l'excès du tirage forcé.

Supposons que l'on fixe à 225 kilogrammes le poids maximum de charbon, par mètre carré de grilles, que l'on peut brûler sur des chaudières d'un système donné, et supposons que, par le réchauffage de l'air, on abaisse de 10 % la consommation, en la ramenant par exemple de 0k,70 à 0k,63 par cheval. Il est clair que, pour le travail déterminé que l'on a en vue, on gagnera 10 % sur la surface de grilles et par suite sur le poids des chaudières, en adoptant des réchauffeurs d'air. Cette économie sera supérieure au poids des surchauffeurs évalué ci-dessus, quand les chaudières pèsent plus de 6t,5 par mètre carré de grilles comme c'est le cas pour les chaudières cylindriques. Sur les chaudières tubuleuses, dont le poids par mètre carré de grilles est toujours inférieur à 6t,5, et, descend même à 3t,5, la surchauffe de l'air impose toujours une surcharge pour l'appareil moteur.

Si maintenant on tient compte de l'économie de combustible, on trouve que le poids de charbon, joint à celui de la chaudière, s'élève toujours à plus de 6t,5 par mètre carré de grilles; dès lors, la surchauffe de l'air donne toujours une économie de poids.

Sous le rapport pécuniaire, une économie de 10 % sur le charbon couvre assez vite les frais de première installation.

§ 6. — Conduite des feux.

46. — *Travail des chauffeurs. Outils de chauffe.* — La tâche principale des chauffeurs est d'entretenir sur les grilles une couche de charbon d'épaisseur uniforme et constante, qui soit en rapport avec l'intensité de la combustion à réaliser. Cette tâche exige une très grande habileté. L'uniformité de l'épaisseur n'est jamais parfaite, surtout avec les grilles longues ; l'air passe en excès partout où le charbon fait défaut. La constance de l'épaisseur à tous les instants est moins nécessaire ;

elle exigerait des chargements très répétés. Le rapport entre l'épaisseur de la couche et la combustion s'établit de lui-même, quand on a le soin de répartir méthodiquement, en charges régulières, le charbon que l'on veut brûler. Il importe de charger très vite, le courant d'air qui entre par les portes ouvertes étant pernicieux, pour le rendement calorifique et pour la conservation des chaudières.

Dans une chauffe bien conduite, les foyers reçoivent à des intervalles égaux, des charges toutes les mêmes. Pour tenir la couche toujours mince, ce qui est particulièrement nécessaire avec les chaudières tubuleuses modèles Belleville, D'Allest, Niclausse, il faut charger souvent et par petites quantités; ainsi dans les essais du *Friant*, avec des chaudières Niclausse brûlant 122 kilogrammes par mètre carré de grilles, on introduisait régulièrement 3 ou 4 pelletées pesant ensemble 13 kilogrammes, à des intervalles de 2 minutes, dans chaque foyer de 3m²,63 de surface de grilles. L'épaisseur de la couche, pour une chauffe donnée, est d'autant moindre que les chauffeurs sont plus habiles, parce que l'air se répartit d'autant mieux que la couche est plus uniforme. On admet que l'épaisseur moyenne doit rester comprise entre dix et quinze centimètres en augmentant un peu avec l'intensité du tirage; mais les bons chauffeurs ne dépassent guère dix centimètres, même aux chauffes très actives des grands tirages forcés.

Outils de chauffe

Rouable

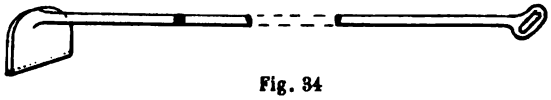


Fig. 34

Coupe suivant M. N

Crochet

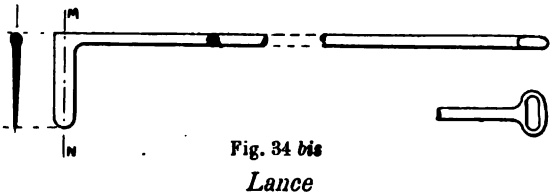


Fig. 34 *bis*

Lance

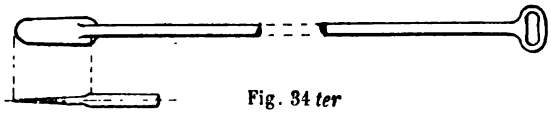


Fig. 34 *ter*

Si le charbon s'entasse sur certaines parties de la grille, la combustion y cesse presqu'entièrement ; la consommation totale de charbon diminue, et la répétition des charges amène l'engorgement de la grille.

La pelle est l'instrument principal des chauffeurs ; elle leur suffit au début d'une chauffe ; ils peuvent acquérir dans son maniement une habileté surprenante, mais seulement après un assez long apprentissage. Les autres outils, les ringards, sont principalement employés au décrassage.

Les ringards sont au nombre de trois, le crochet, la lance, le rouable : le crochet sert à nettoyer la grille par en dessous sans ouvrir la porte du foyer ; la lance sert à soulever le charbon de dessus la grille pour le rejeter à droite ou à gauche, et à décoller les galettes de mâchefer. Le rouable sert à pousser le charbon en avant ou en arrière. Le maniement de ces trois outils exige que les chambres de chauffe aient une largeur supérieure de $0^m,50$ environ à la longueur des grilles.

47. — *Décrassage des grilles. Grilles secouables.* — Le charbon, en brûlant, laisse un résidu infusible, composé surtout de silicate d'alumine, qui forme les escarbilles, et un résidu fusible composé surtout de silicates alcalins, qui est le mâchefer. Le mâchefer s'amasse sur les barreaux de grille, bouche leurs interstices, arrête le passage de l'air, et se refroidit alors en une plaque continue, friable et peu adhérente. Le mâchefer peut aider à marcher à feux retenus, mais il est tout à fait préjudiciable à une chauffe active. Après 10 heures de chauffe, un charbon donnant 3 % de mâchefer, dans une combustion réglée à 100 kilogrammes, déposerait sur la grille une couche générale de mâchefer de 1 centimètre d'épaisseur, qui supprimerait tout passage d'air. Déjà, après cinq ou six heures, les feux commencent à être sales ; les grilles, vues en dessous, présentent un éclairage très irrégulier ; on passe alors le crochet à travers les parties noires, en ayant soin de le ramener toujours d'arrière en avant ; plus tard, avec la lance et le rouable, on arrive à retirer les plus grosses galettes de mâchefer et à retarder ainsi, par un décrassage *à l'anglaise*, le moment de l'opération véritable, qui consiste à décharger la grille, en la mettant entièrement à nu sur ses deux moitiés de droite et de gauche successivement. Le décrassage proprement dit est une opération pénible, que l'on fait en général à la fin des quarts, toutes les 8 heures. Le décrassage fait perdre une quantité notable de charbon, emporté avec le mâchefer ; il doit être évité, dans les expériences de consommation destinées à donner des résultats comparatifs. Les essais de vitesse se font, bien entendu, avec des feux parfaitement propres.

Les grilles secouables employées en Amérique sont destinées à supprimer le décrassage ; elles se composent de panneaux fondus d'une seule pièce qui peuvent osciller autour d'un axe horizontal ; l'axe est en

général transversal; les barreaux s'endentent les uns dans les autres et il suffit de faire osciller un panneau sur deux. Quelques secousses suffisent pour faire tomber toutes les escarbilles et même une partie du mâchefer brisé. Nous avons vu plus haut que M. Niclausse poursuit en ce moment des expériences, sur un mode de tirage par injection de vapeur, qui paraît supprimer la formation du mâchefer.

48. — *Ramonage.* — La suie, sur les surfaces de chauffe, n'est pas moins nuisible que le mâchefer sur les grilles. Vingt-quatre heures en général après le départ, et ensuite de douze en douze heures, il faut ramoner. Sur les chaudières cylindriques, on passe des brosses à travers les tubes, ou bien on y lance un jet de vapeur; l'opération est assez facile, mais elle est très pénible, à cause de la chaleur, surtout avec les tubes en prolongement. Sur les chaudières tubuleuses, les jets de vapeur, malgré la réparation d'eau douce qu'ils nécessitent, sont à peu près le seul moyen de ramonage possible.

Les chaudières Belleville et Niclausse se ramonent assez facilement à la vapeur, en raison de la direction des tubes perpendiculaires à la façade.

M. D'Allest a imaginé pour sa chaudière, un ramoneur à vapeur spécial qui rend l'opération très rapide. Cet appareil est représenté figures 35, 35 *bis*, 35 *ter*; il se compose d'une série de tubes parallèles montés sur un tube unique pouvant tourner autour de son axe; ces tubes, en tournant, passent comme une sorte de peigne entre les files horizontales de tubes de la chaudière; ils lancent un jet de vapeur par leur extrémité, et une lame de vapeur très mince par des fentes d'un dixième de millimètre pratiquées le long de leurs génératrices; le ramonage est ainsi général et parfait. L'appareil D'Allest, s'il n'est pas exposé à trop d'avaries, mériterait d'être généralisé sur toutes les chaudières à tubes horizontaux; il n'est malheureusement pas applicable aux chaudières genre Du Temple.

Sur les chaudières système Du Temple, à faisceaux de tubes courbes, les brosses peuvent atteindre une partie des tubes; mais, pour ramoner complètement, il faut promener un jet de vapeur dans tout le faisceau. La plus grande partie de la suie est entraînée vers la cheminée; il en tombe aussi sur les réservoirs inférieurs, dans les parties basses de la chaudière, d'où il est difficile de la chasser. La difficulté du ramonage est, pour ces chaudières, un inconvénient sérieux. Quand la chauffe ne dure que quelques heures, dans les essais à outrance par exemple, on peut faire ramoner par un courant d'air très violent. On profite à cet effet de la dernière quantité de vapeur, quand les feux sont tombés, pour lan-

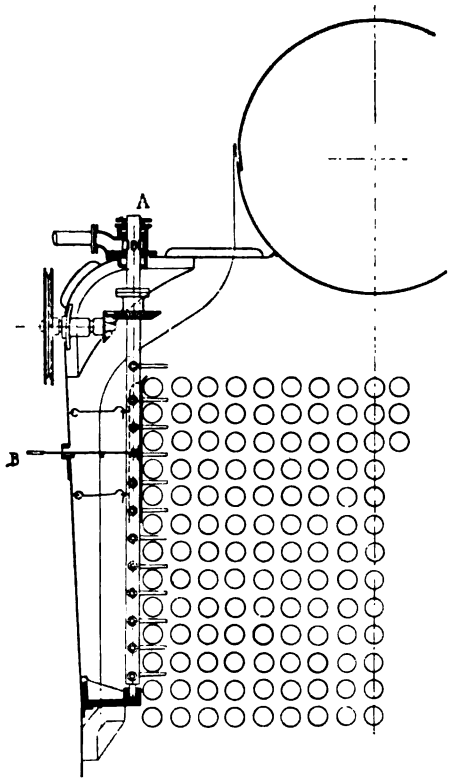


Fig. 35

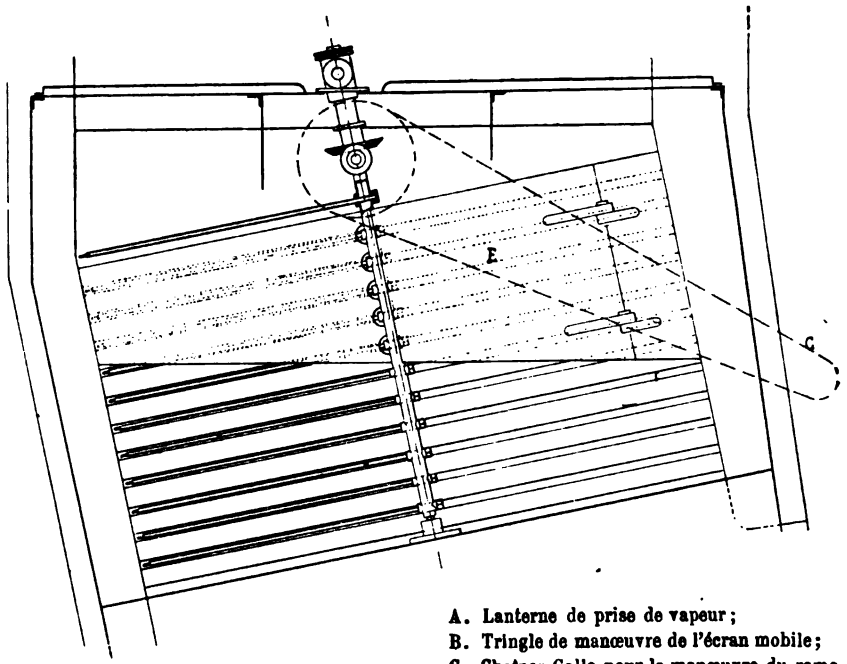


Fig. 35 *bis*

A. Lanterne de prise de vapeur ;
B. Tringle de manœuvre de l'écran mobile ;
C. Chaines Galle pour la manœuvre du ramoneur.

Coupe verticale par un tube de ramonage.

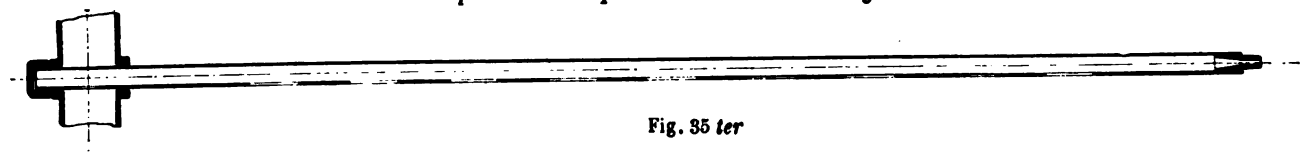


Fig. 35 *ter*

cer les ventilateurs à leur plus grande allure, en tenant les portes de cendriers fermées pour faire monter la pression d'air dans la chambre de chauffe; puis on ouvre brusquement portes de foyers et portes de cendriers. Ce moyen, employé avec succès par M. Chevalier de la maison Normand, constitue l'essai le plus probant de la solidité et de la rusticité des chaudières type Du Temple; une opération semblable serait destructive pour beaucoup de modèles de chaudières.

On trouvera au n° 88, quelques indications complémentaires sur les précautions à prendre pendant le ramonage.

49. — *Entraînements d'eau. Préservatif cherché dans l'huile minérale.* — Les entraînements d'eau se produisent par la juxtaposition des bulles de vapeur, qui se soudent entr'elles, au lieu de crever à la surface de l'eau, et forment ainsi une sorte de mousse, demi-liquide, demi-gazeuse, qui remplit le coffre à vapeur, et passe des chaudières aux cylindres. On dit alors qu'il y a ébullition tumultueuse, ou encore que la chaudière *prime*. Les anciennes chaudières à retour de flamme, surtout celles à basse pression, d'un fonctionnement si sûr à d'autres égards, étaient très exposées à primer.

Les entraînements d'eau tiennent à deux causes : l'abondance de production de la vapeur et la viscosité de l'eau. Il est facile de calculer qu'une chaudière cylindrique, à trois foyers, vaporisant 5100 kilogrammes d'eau à l'heure, produit 13 millions et demi de bulles de vapeur de deux millimètres de diamètre à la pression de 12 kilogrammes; dans ces conditions, le dégagement des bulles se fait assez bien; mais, lorsque la pression était de 4 kilogrammes, le nombre de bulles était presque triple, et le moindre incident produisait l'ébullition tumultueuse. L'ouverture trop rapide des soupapes d'arrêt et des registres de vapeur, qui amène un abaissement de pression à la chaudière et par suite une surproduction subite de vapeur, est souvent la cause d'un entraînement d'eau.

Les moyens préventifs sont, dans la construction de la chaudière, l'adoption de grandes surfaces de niveau d'eau pour le dégagement de la vapeur, et l'emploi des hautes pressions qui diminue le volume de vapeur.

En marche, il faut se prémunir contre la viscosité de l'eau, en évitant toute production de matières savonneuses. La combinaison des acides gras provenant du graissage des cylindres avec les matières alcalines introduites dans les chaudières, a longtemps créé des dangers permanents; les chaudières qui avaient été graissées intérieurement, dans un but de conservation, avaient besoin d'un lessivage énergique et prolongé avant d'être remises en marche. L'emploi des huiles minérales

pour lubrifier les cylindres et les tiroirs a été, sous ce rapport, un très grand progrès ; il a permis de réaliser, sur les torpilleurs, des intensités de vaporisation que l'on n'aurait sans doute pas pu atteindre autrefois, sans vider les chaudières par le tuyau de vapeur. L'absence de matières savonneuses n'est pas suffisante ; l'eau doit être pure ; certaines sources saumâtres sont impropres à l'alimentation des chaudières.

Les bons effets de l'huile minérale ont fait quelque temps adopter cette substance comme un spécifique contre les entraînements d'eau ; on en introduisait directement dans les chaudières, en considérant qu'une couche de 1 à 2 millimètres, entretenue à la surface de l'eau, filtre pour ainsi dire les bulles, et les fait crever en retenant l'eau au-dessous d'elle. Quoi qu'il en soit de cette propriété, l'huile minérale dans les chaudières ne flotte pas longtemps ; elle coule sous forme de dépôt brun, très mauvais conducteur de la vapeur, très dangereux pour les surfaces de chauffe, comme nous le verrons au n° 76. Aujourd'hui, les précautions les plus minutieuses sont de règle, pour éviter toute introduction, même accidentelle, d'huile minérale dans les chaudières.

Quand, malgré les mesures préventives, un entraînement vient à se produire, on en est immédiatement prévenu par la disparition subite du niveau dans les tubes, suivie bientôt de chocs dans les cylindres de la machine. Pour éviter les avaries de machine, on réduit aussitôt l'allure, puis on ouvre les purges des cylindres et du tuyautage. En même temps, on ralentit les feux en fermant les portes de cendriers ; parfois même en ouvrant les portes des boîtes à tubes sur les chaudières cylindriques ; mais ce dernier moyen n'est pas à recommander. L'entraînement, une fois commencé, se continue avec ténacité malgré la réduction apportée à l'évaporation ; on essaie alors l'effet d'une fermeture brusque des soupapes d'arrêt, qui produit une onde de pression, brise les bulles dans le coffre à vapeur, et fait reparaître les niveaux.

Une disparition subite du niveau ne justifie jamais une panique ; après avoir ouvert en grand les régulateurs d'alimentation, on peut attendre patiemment pendant quelques minutes. Sur une chaudière cylindrique à retour de flamme, le ciel des boîtes à feu peut rester découvert pendant dix minutes s'il y a du roulis, pendant cinq minutes si le navire est immobile, sans que les coups de feu soient à craindre. Sur les chaudières à tubes en prolongement, le ciel des boîtes à feu, frappé plus directement par les flammes, peut arriver plus vite à une température dangereuse. Dans tous les cas, si le niveau était bon avant le commencement de l'ébullition tumultueuse, il est certain que l'eau existe toujours sous une forme ou sous une autre, et que, même à l'état d'émulsion, elle empêche la tôle de rougir ; on peut donc rassurer les

chauffeurs, et ne mettre bas les feux qu'à la dernière extrémité, c'est-à-dire après un délai d'une dizanie de minutes.

Parmi les chaudières tubuleuses, celles à circulation limitée, et celles surtout où le niveau est dans les tubes, sont exposées à des entrainements violents, lorsque l'évaporation est subitement excitée par une diminution de la pression ; c'est ainsi qu'avec les chaudières Belleville, il importe de mettre la machine en route graduellement. Les chaudières tubuleuses à circulation rapide sont moins sujettes aux entrainements d'eau, surtout quand le niveau est un peu élevé dans le réservoir.

50. — *Disparition accidentelle des niveaux. — Effet de la bande.* — Quand on vient à s'apercevoir que les niveaux ont disparu dans les tubes, sans qu'il se produise de chocs dans les cylindres, et surtout quand on ignore depuis combien de temps l'eau manque, il ne faut pas hésiter à prendre une décision énergique et à mettre bas les feux, en se rappelant qu'un affaissement des ciels de boites à feu peut amener une catastrophe pour le personnel, avec les chaudières tubulaires, et qu'un coup de feu dans le faisceau d'une chaudière tubuleuse, un peu moins dangereux pour les hommes, produit la destruction complète de l'appareil. Les accidents des torpilleurs sont très instructifs à ce sujet ; on peut citer l'affaissement du ciel de foyer sur la chaudière modèle locomotive du torpilleur n° 122 et la destruction des faisceaux de tubes entièrement fondus sur une chaudière Thornycroft à bord du *Coureur* et sur une chaudière Du Temple à bord de l'*Averne*. Les enquêtes sur les accidents de ce genre concluent toujours à un défaut d'alimentation.

Quelquefois, ce n'est pas l'eau qui manque, c'est la paroi des conduits de flamme qui s'élève au-dessus du niveau, à une des extrémités de la chaudière, par suite de la bande ou d'un changement de l'assiette longitudinale du navire. La bande, en particulier, peut amener le ciel des boites à feu et des foyers au-dessus de l'horizontale passant par la surface de l'eau dans le tube de niveau. Il y a là une source de dangers, sur laquelle l'attention du mécanicien doit être en éveil, pendant les évolutions des navires qui s'inclinent beaucoup sous l'action du gouvernail. Le roulis et le tangage, en faisant osciller le niveau dans la chaudière, sont une cause de sécurité.

51. — *Autres accidents et incidents divers.* — Les accidents auxquels on est exposé, ainsi que les moyens de les prévenir et de les réparer, varient complètement selon le système de chaudière. Nous nous bornerons à indiquer ici que, sur les chaudières cylindriques, les foyers et les plaques de tête sont des parties délicates, exposées à des accidents très graves. Les chaudières tubuleuses sont plus robustes dans leur

ensemble ; mais leur fonctionnement exige des soins plus minutieux ; les avaries, moins redoutables mais très nombreuses auxquelles elles sont soumises, sont quelquefois incommodes à réparer ; il est impossible, par exemple, de tamponner en marche un tube percé.

Les grands accidents pouvant dégénérer en catastrophes, se produisent plus souvent dans le tuyautage que dans les chaudières proprement dites ; la gravité de leurs conséquences dépend beaucoup du sang-froid des équipes de chauffe, car le temps manque souvent pour examiner la situation et donner des ordres. Avec les équipes très exercées des chauffes d'essai, il y a des chances pour que les soupapes d'arrêt soient fermées, en cas de déchirure légère du tuyautage, avant que la chambre de chauffe soit envahie par la vapeur.

Quand les fuites se produisent dans les chaudières mêmes, elles peuvent renvoyer les flammes en arrière et les chasser par les portes des foyers et même des cendriers, ce qui rend la chambre de chauffe immédiatement intenable. Pour combattre les retours de flamme, il faut naturellement faire monter la pression de l'air dans la chambre de chauffe, si l'on marche en vase clos, et forcer l'allure des ventilateurs, en même temps qu'on lève les soupapes de sûreté. Il importe que les portes de foyers, soient disposées de manière à ne pas pouvoir s'ouvrir sous l'action d'une pression intérieure, et il est bon que les portes de cendriers se ferment automatiquement.

En cas de fuites aux chaudières ou au tuyautage, il n'y a guère d'autre recommandation générale à faire que celle de soulever les soupapes de sûreté, d'ouvrir l'arrivée de vapeur aux machines, et, si c'est possible, de ne pas déserter la chambre de chauffe en y laissant des feux actifs et une alimentation insuffisante.

52.— *Conditions de chauffe particulières aux essais. Mesure de la durée d'une expérience.* — Les essais de la machine, surtout les essais de recette, dans lesquels on se propose à la fois de pousser la combustion à son maximum d'intensité, et d'obtenir du charbon brûlé la meilleure utilisation possible, exigent des chauffeurs très habiles, et demandent, de la part des ingénieurs, une pratique de la chauffe qui ne s'obtient qu'après quelques années de service.

On s'est élevé quelquefois contre les essais à outrance ; mais ces essais restent indispensables, pour permettre de comparer tous les appareils entr'eux dans des conditions identiques, et pour faire voir de quel effort ils sont susceptibles. Les essais modérés, dits de consommation, servent de plus à faire connaître ce que l'on doit exiger des mécaniciens, comme économie de combustible.

Dans tous les essais, essais à outrance ou autres, dans lesquels la consommation est mesurée, on brûle du combustible pesé à l'avance et mis en sacs. La quantité de charbon, jetée sur les grilles pendant l'essai, est ainsi connue très exactement ; mais la durée même de l'expérience, qui doit prendre fin à un moment où la quantité de charbon dans les foyers est la même qu'au commencement, ne peut être fixée avec une entière précision. En fait, il est imposisble, même à un observateur très exercé, de juger de la quantité de charbon qui existe sur une grille ; sur des foyers bien chargés, cette quantité ne diminue pas d'une manière appréciable à l'œil, en six à huit minutes ; il peut donc y avoir une incertitude, allant jusqu'à trois ou quatre pour cent, sur la durée d'un essai de quatre heures.

On a quelquefois employé, pour fixer la durée d'un essai de consommation, le procédé suivant, dû à M. Joessel, dont le principe est assez rationnel, mais dont l'application n'est pas sans difficulté. Au début, on charge tous les foyers ensemble, ce qui amène une baisse de pression momentanée ; puis on laisse la combustion s'opérer ; la pression remonte, et reste ensuite stationnaire, jusqu'à un moment où un nouvel abaissement se dessine ; ce dernier moment est pris pour le commencement de l'essai. On opère de même pour la fin de l'essai. L'ouverture des registres n'ayant pas varié, on suppose que le commencement de la chute de pression correspond au même état de grilles ; cette hypothèse ne tient pas compte de l'encrassement des feux.

Dans une école d'ingénieurs en Amérique, on enseigne une autre méthode, propre à donner d'un essai à l'autre des résultats comparables. On met bas les feux au début, on recharge avec du bois et du charbon pesés ; on poursuit l'essai, et à la fin, on met de nouveau les feux bas, en pesant tout ce qui est retiré de la grille. La complication de cette opération suffit pour la faire écarter de la pratique.

Le moyen le plus sûr de bien conduire un essai de consommation parait être dans l'emploi d'une chauffe méthodique commencée avant l'essai, avec des chargements espacés très régulièrement, de telle sorte que le rythme soit pris avant l'ouverture de l'expérience et que les feux soient arrivés à un état permanent. On clôt l'expérience à un instant qui corresponde exactement, au point de vue des périodes de chargement, à l'instant où on l'a commencée.

L'usage des chauffes méthodiques préconisé, il y a plus de trente ans, par le contre-amiral Labrousse et abandonné après lui, tend de plus en plus à reprendre faveur aujourd'hui, même quand il ne s'agit pas d'essais de consommation, et qu'on se propose simplement de donner à la chauffe la régularité requise pour une bonne utilisation du combustible.

53. — *Tentatives de chargement mécanique du charbon.* — De nombreuses tentatives ont été faites pour opérer mécaniquement le chargement des grilles, dans le double but d'obtenir une combustion beaucoup plus régulière que par les chauffes les plus méthodiques, et de supprimer le travail si fatigant des chauffeurs.

Parmi les dispositions expérimentées dans la marine, la plus ingénieuse a consisté dans l'emploi d'une grille composée de chaînes sans fin, du système Galle, juxtaposées et animées d'un mouvement lent ; le charbon, déposé par une trémie à l'entrée du foyer, arrivait à l'autel, complètement brûlé ; le décrassage se faisait automatiquement comme le chargement.

Après essai, toutes les grilles à chargement automatique ont été abandonnées ; il a fallu en revenir au chauffeur muni de sa pelle et de ses ringards.

CHAPITRE V

CHAUFFAGE AU PÉTROLE.

54. — *Différentes sortes de pétrole employées au chauffage.* — L'alimentation automatique et continue des chaudières en combustible, dont l'impossibilité paraît reconnue avec le charbon, après bien des essais de chargement mécanique, se réalise sans peine par l'emploi du pétrole.

Le pétrole, d'introduction assez récente, comme combustible, se trouve dans deux centres d'exploitation, la Pensylvanie près de Pittsburg et le district de Bakou sur la mer Noire. Le pétrole de Bakou, ou plutôt le résidu de distillation, qui en constitue la partie la plus lourde et la moins volatile, est par excellence le combustible liquide des chaudières marines.

Le pétrole de Bakou, soumis à la distillation, donne d'abord quelques vapeurs très inflammables qu'on laisse échapper, puis l'huile d'éclairage ou kérosène qui forme environ 80 % de son poids, ensuite des huiles lampantes, moins inflammables mais encore très fluides, qui sont employées pour le graissage, enfin le résidu visqueux d'huile lourde, appelé *mazout* ou *astatki*, qui n'a d'emploi que comme combustible et qu'on a longtemps laissé perdre. La proportion de mazout est d'environ 17 %. Le mazout ne dégage pas de vapeur au-dessous de 120 degrés, et ne s'enflamme pas lui-même au-dessous de 150 degrés; il peut être exposé impunément à l'explosion d'un obus Hotchkiss; sa conservation et son maniement offrent donc peu de danger; il ne contient pas moins de 11,7 % d'hydrogène, ce qui lui donne un excellent pouvoir calorifique, comme à toutes les huiles minérales.

Le pétrole de Pensylvanie ne contient pas de mazout: quand on l'emploie au chauffage, comme on fait souvent en Amérique, soit dans les chaudières fixes, soit dans les locomotives, c'est du kérosène que l'on brûle. La marine répugne à un combustible aussi dangereux, même en négligeant la question de prix.

55. — *Chauffage par combustion du pétrole liquide. Augets et mèches.* — Dans les premières tentatives pour brûler le pétrole, on l'employait

simplement à l'état liquide, en le faisant couler sur les barreaux de grille creusés en forme d'augets : c'est la méthode adoptée par M. Sainte-Claire-Deville, dans son laboratoire et à bord du *Puebla*, et par M. Zédé, à l'arsenal de Brest, il y a une vingtaine d'années (fig. 36). Le contact avec l'air était tout à fait insuffisant, la combustion lente et irrégulière, la production de fumée excessive.

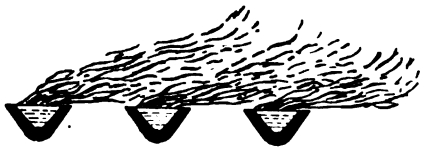


Fig. 36

M. Nobel, de Saint-Pétersbourg, a obtenu un meilleur résultat des augets, en les plaçant au-dessus les uns des autres, de manière à les chauffer tous sauf celui du bas, et à brûler le pétrole sous la forme parfaite des combustibles, à l'état de vapeur (fig. 37). Cette disposition ne s'est pas développée au delà de quelques applications métallurgiques.

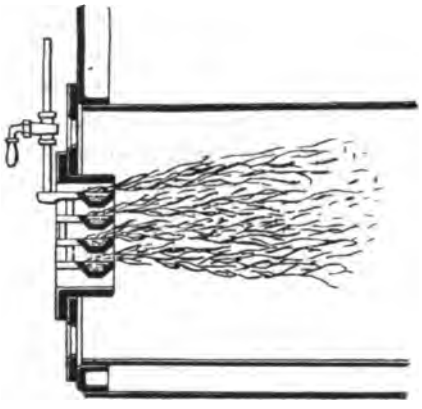


Fig. 37

En général, pour donner au combustible liquide une surface de contact convenable avec l'air, on a opéré comme pour l'éclairage, en employant des mèches, mais sans réaliser d'ailleurs la distribution d'air des lampes à double courant d'air, et en restant, par suite, dans des condiditions imparfaites. L'appareil de ce genre le mieux expérimenté dans la marine est celui de M. Ferrari, de Gênes, qui se compose simplement d'augets longitudinaux contenant les mèches, séparés par des écrans destinés à la répartition de l'air; un tube percé de trous placé sous chaque mèche, lui distribue le pétrole sur toute sa longueur.

Deux séries d'essai ont été faites à Toulon, avec les mèches Ferrari, sur l'*Amalia* et sur le torpilleur 139.

Sur l'*Amalia*, on n'avait en vue qu'une chauffe très modérée; deux augets seulement avaient été installés dans chaque foyer à la place de la grille; la puissance développée avec une machine compound n'a pas dépassé cent chevaux par foyer. Même dans ces conditions, la combustion restait incomplète et la flamme fuligineuse. Le résultat économique était d'ailleurs satisfaisant par rapport au charbon; dans un essai au point fixe, on a dépensé $0^k,948$ de mazout par cheval et par heure,

et, dans un essai en marche, 0k,801 seulement, tandis que la consommation de charbon est de 1k,353 sur ce bâtiment.

Fig. 38

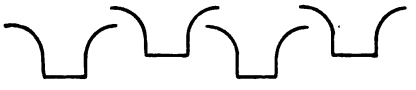


Fig. 38 *bis*

Sur le torpilleur 139, où il s'agissait de réaliser la chauffe très active du tirage forcé, les essais ont été faits successivement avec neuf augets juxtaposés, figure 38, et avec quinze augets placés à deux hauteurs différentes, figure 38 *bis*; on a fait varier, avec la disposition des augets, celle des écrans percés de trous pour le passage de l'air, et on a employé diverses sortes de mèches. On est resté au-dessous de la puissance qui se réalise avec le charbon, dans une proportion décourageante.

56. — *Chauffage à la vapeur de pétrole.* — L'état liquide, commode pour la distribution, ne convient évidemment pas à la combustion. Pour produire le mélange intime avec l'air, nécessaire à la combinaison chimique, il faut faire un pas de plus, en amenant le combustible à l'état gazeux. Cette solution a été adoptée, mais seulement dans un petit nombre d'appareils destinés à l'emploi des huiles volatiles du genre des kérosènes.

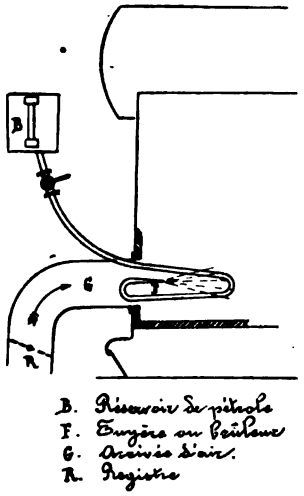


Fig. 39

Dans la chaudière Leblond et Caville, le kérosène est refoulé par une pompe dans un réservoir, d'où il s'écoule sous pression dans un tuyau recourbé, comme l'indique la figure 39; l'huile se vaporise dans le retour du tuyau qui traverse le jet de flamme et s'échappe par un bec aplati. Deux becs suffisent, dans un foyer d'un mètre de large, pour remplacer la grille; la combustion peut se faire, soit au tirage naturel, soit au tirage forcé dans le système dit « cendrier clos ». Sur une chaudière genre Du Temple, essayée à Cherbourg, MM. Leblond et Caville ont vaporisé par kilogramme de pétrole, respectivement 11,5 et 9,46 kilog. d'eau, au tirage naturel et au tirage forcé.

Dans le brûleur Symon-House (fig. 40), l'huile se vaporise dans un réservoir cylindrique R exposé à l'action de la flamme, où elle suit un parcours compliqué. Le gaz combustible s'échappe par un bec, dont l'ouver-

ture est réglée à l'aide d'une aiguille *i*, et qui est entouré d'un ajutage amenant l'air autour du jet. L'allumage se fait en chauffant le réservoir R R avec une lampe. Un *igniteur* ou *réinflammateur*, rempli de terre ré-

Brûleur Symon-House

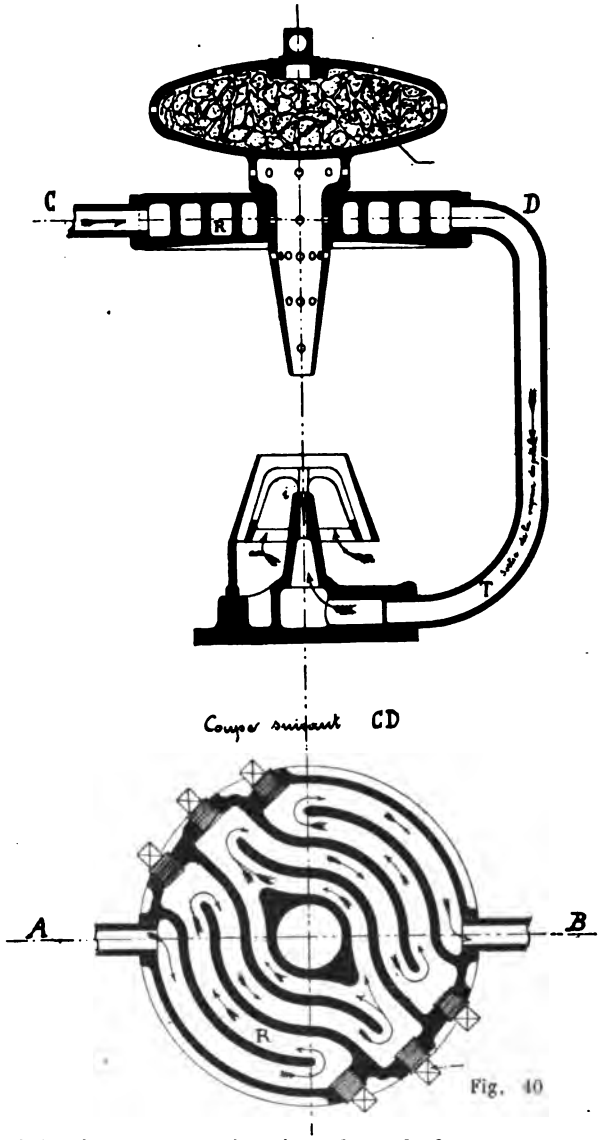


Fig. 40

fractaire, a été récemment ajouté en face du bec, au centre du réservoir. La chaudière Symon-House, attelée à une machine compound de 20 chevaux, brûle 1 kilogramme de pétrole par cheval, ce qui n'indique pas un ensemble très économique.

Enfin dans le moteur Escher-Wiss qui emploie le pétrole comme liquide vaporisable, la chaudière fournit le jet de vapeur combustible.

Au lieu de vaporiser le pétrole, on peut le lancer à haute pression par des orifices assez petits pour que le jet soit réduit en poussière liquide intimement mêlée à l'air. Cette disposition, qui exige une huile très fluide et ne peut donner que des jets de faible puissance, est surtout utilisée pour les appareils d'allumage et de mise en pression, sur les chaudières munies de pulvérisateurs dont nous allons maintenant parler.

57. — *Pulvérisateurs; modèles divers.* — Actuellement, le moyen presque universellement employé pour brûler le mazout consiste à le lancer en jet puissant, par un orifice assez large pour qu'il s'échappe facilement et régulièrement, malgré sa viscosité, surtout si l'on a le soin de chauffer, avec une chemise de vapeur, le tuyau qui l'amène. Pour réduire en poussière le jet ainsi produit, on le combine avec un jet également puissant, parfois oblique, plus souvent concentrique, de vapeur ou d'air comprimé. On emploie par exemple un jet pulvérisant de vapeur ou d'air à 6 kilogrammes de pression pour un jet de pétrole lancé à 3 kilogrammes; le jet résultant se mêle de lui-même intimement à l'air qu'il traverse, et donne une flamme claire, sans fumée, quand on règle convenablement le débit relatif des deux jets. Les jets de pétrole sont fournis par une pompe foulante, alimentée par un petit réservoir, où une seconde pompe puisant à la citerne maintient un niveau à peu près constant.

Les becs ou pulvérisateurs, pour la combustion du pétrole sous cette forme, présentent des dispositions qui varient à l'infini. Le plus souvent les orifices sont circulaires ou annulaires; alors le jet de pétrole est placé tantôt au centre du jet d'air ou de vapeur, ce qui le rend plus constant et plus facile à régler, tantôt concentriquement autour du jet gazeux, ce qui rend la pulvérisation plus facile et moins dispendieuse comme travail; quelquefois une buse supplémentaire concentrique est ajoutée, pour l'arrivée sans pression de l'air de combustion. Au lieu de becs circulaires, on emploie quelquefois des fentes rectangulaires très étroites, d'où les deux jets s'échappent en se frappant sous des angles prononcés; la fente où passe le pétrole exige un entretien soigné, pour éviter les obstructions partielles.

Le réglage des deux jets, pour les bien proportionner l'un à l'autre, et faire en même temps varier la puissance du brûleur selon l'intensité de la chauffe à obtenir, est assez délicat. Pour le jet pulvérisateur, on se contente d'agir sur un robinet d'admission au brûleur, faisant ainsi varier la pression à la sortie de la buse. Pour le jet de pétrole, on préfère

souvent garder la pression constante, en faisant varier la section de la buse à l'aide d'une aiguille;. mais on s'expose ainsi à des irrégularités de fonctionnement, parce que le mazout s'écoule mal par une fente annulaire, et que le défaut de centrage ou le battement de l'aiguille est toujours à craindre. On facilite beaucoup le réglage en construisant chaque pulvérisateur pour une combustion déterminée, et en faisant varier le nombre des pulvérisateurs avec l'intensité de la chauffe.

Brûleur Kauffmann

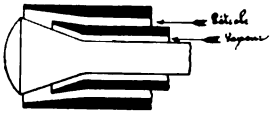


Fig. 41

Brûleur Anderson

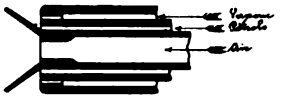


Fig. 42

Brûleur Urquhart

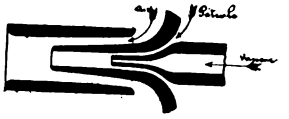


Fig. 43

Brûleur Cuniberti

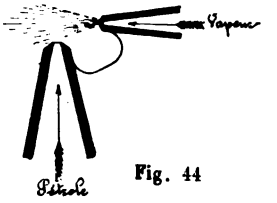


Fig. 44

Brûleur Guyot (Torpilleur 22)

1/2 grandeur

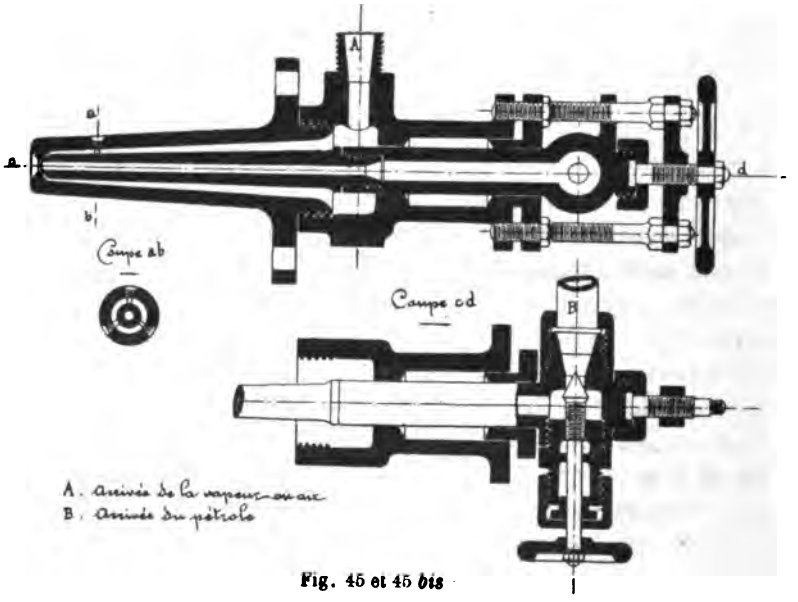


Fig. 45 et 45 *bis*

Les croquis ci-dessus (fig. 41, 42, 43) représentent la disposition des buses dans quelques-uns des modèles de pulvérisateurs les plus répandus en Amérique et en Russie: l'orifice de pétrole est annulaire; un écran

conique est parfois disposé, pour produire un entrecroisement des jets favorable à la pulvérisation.

La figure 44 représente la disposition usuelle des jets dans les brûleurs à lames, qui rappelle celle d'un appareil pharmaceutique bien connu. En Italie, M. Cuniberti a donné à des jets cylindriques cette direction convergente pour produire la pulvérisation.

L'appareil généralement employé dans la marine française est le brûleur Guyot, qui a été essayé d'abord sur le *Buffle* et sur le torpilleur 22, et dont la figure 45 représente la disposition actuelle. Le jet de vapeur se règle par le mouvement de l'aiguille centrale, qui contient le canal d'arrivée du pétrole. Quoique plus facile que celui du jet de pétrole, le réglage du jet de vapeur par une aiguille exige encore des soins, pour que l'aiguille reste bien centrée. Il importe aussi que les aiguilles ne soient pas trop longues, et ne fassent jamais la saillie en dehors du jet de vapeur, qui est indiquée figure 46.

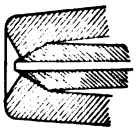


Fig. 46

58. — *Disposition des foyers au pétrole. Ecrans et revêtements en maçonnerie.* — Le jet de pétrole pulvérisé forme une longue colonne de flamme; la rencontre avec une paroi froide, telle qu'une tôle de chaudière à la température de 150 degrés ou 200 degrés, interromprait immédiatement la combustion, et le pétrole déposé sur la paroi ne se réenflammerait même pas. De là, des précautions particulières à prendre pour assurer une bonne combustion.

Si les foyers sont peu profonds, on arrête le jet contre une paroi de briques, qui s'échauffe assez pour que la poussière de pétrole s'enflamme et brûle à son contact. Telle est la disposition adoptée par M. Urquhart, sur les locomotives de la ligne Graziani-Taretzin, et représentée figure 47; l'écran qui reçoit le jet se prolonge, en dessus et sur les côtés, par des cloisons en maçonnerie percées d'ouvertures, à travers lesquelles s'échappent les gaz de la combustion; l'air arrive par en dessous. Une disposition analogue a été adoptée sur une chaudière de torpilleur disposée pour le chauffage au pétrole, à Cherbourg, en septembre 1893; les brûleurs étaient dirigés transversalement dans le foyer, et l'air arrivait par dessous

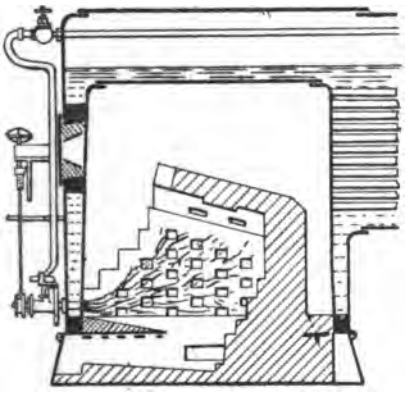


Fig. 47

(fig. 48). Quelquefois l'écran, disposé pour arrêter la flamme en avant des surfaces refroidissantes, est percé d'ouvertures à travers lesquelles une partie du jet passe, en se brûlant complètement à la chaleur de leurs parois.

Chaudière locomotive (Type E)

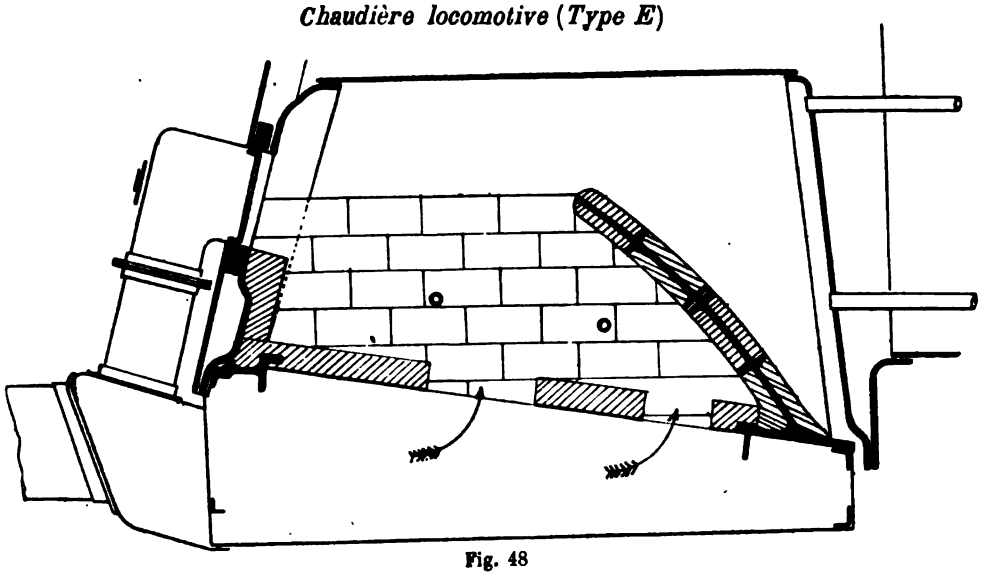


Fig. 48

Chaudière du torpilleur 22

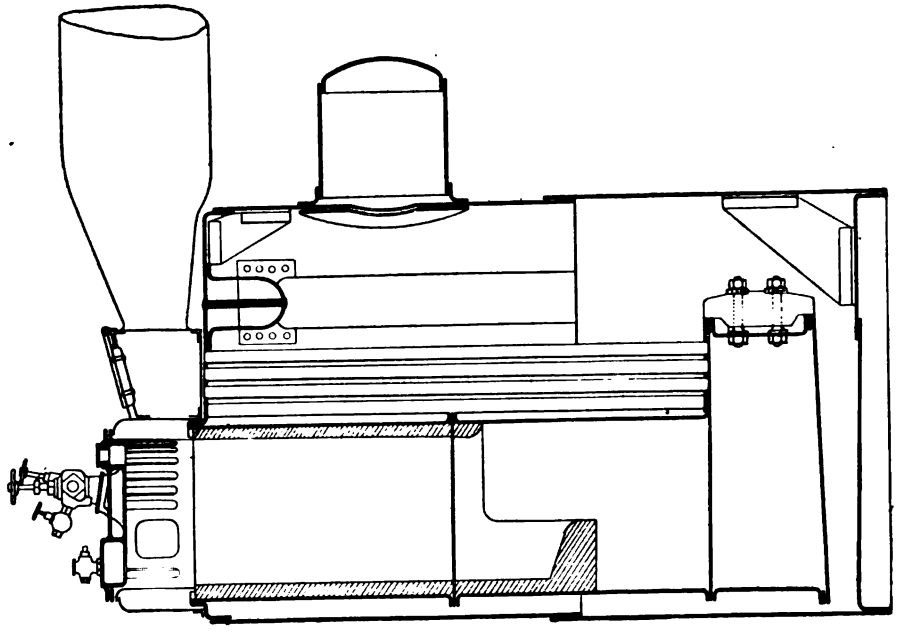


Fig. 49

Quand le foyer est suffisamment long, il y a tout avantage à laisser la flamme s'étendre et se développer librement ; mais il est utile d'entourer d'une maçonnerie pouvant s'échauffer au rouge, toute la région antérieure du jet, qui dépose des goutelettes de pétrole quand la pulvérisation est imparfaite. Telle est la disposition de la figure 49, qui représente une chaudière cylindrique à retour de flamme, disposée pour la chauffe au pétrole sur le torpilleur 22; les brûleurs sont dans un petit avant-foyer percé latéralement pour laisser entrer l'air perpendiculairement aux jets. Avec des courants d'air frappant ainsi obliquement les jets de pétrole, le rendement en vapeur diminue rapidement lorsque l'intensité du tirage forcé augmente. Sur le torpilleur 22, on a vaporisé de $11^k,06$ à $10^k,8$ d'eau par kilogramme de pétrole, aux pressions de vent de 20 à 30 millimètres d'eau, et de $9^k,45$ à $8^k,50$ seulement, aux pressions de vent de 95 à 110 millimètres; sur une chaudière Godard disposée avec des buses suivant l'axe du foyer et une arrivée d'air par le cendrier, la production de vapeur est descendue jusqu'à $8^k,25$ par kilogramme de pétrole, dans la marche aux pressions d'air de 80 à 90 millimètres d'eau. L'arrivée de l'air parallèlement à la direction des jets présente des conditions de combustion beaucoup plus avantageuses; on a vaporisé ainsi jusqu'à $13^k,25$ d'eau, à Cherbourg, en 1890, sur une chaudière à retour de flamme.

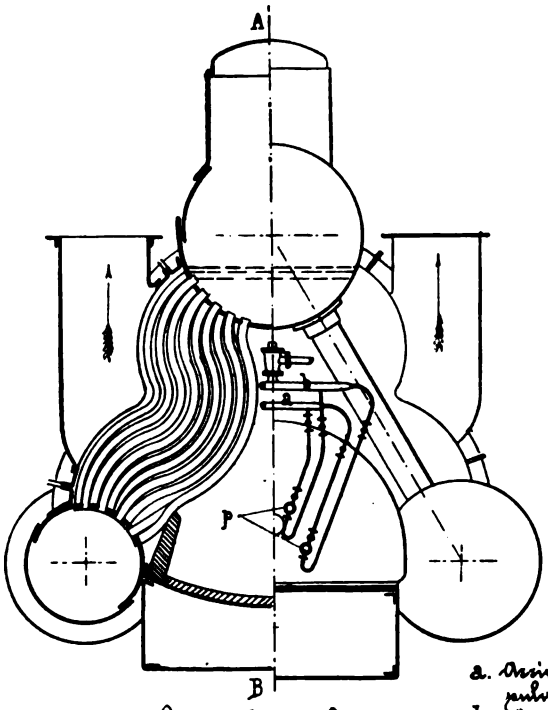
La figure 50 représente le foyer adopté en dernier lieu par M. Guyot, qui a dirigé tous les essais de chauffage au pétrole faits à Cherbourg. Les pulvérisateurs, au nombre de cinq, sont placés dans un avant-foyer en maçonnerie; l'air pénètre principalement par en dessous. La chaudière est du modèle Du Temple, avec retour longitudinal de flamme vers la façade, disposition que M. Guyot a été le premier à introduire. Le rendement dans les essais a diminué un peu, quand la pression de vent a augmenté, mais pas au delà de ce qui se rencontre avec le charbon; il a passé de $12^k,5$ à $11^k,3$ d'eau vaporisée par kilogramme de pétrole, quand le tirage s'est élevé de 8 à 45 millimètres.

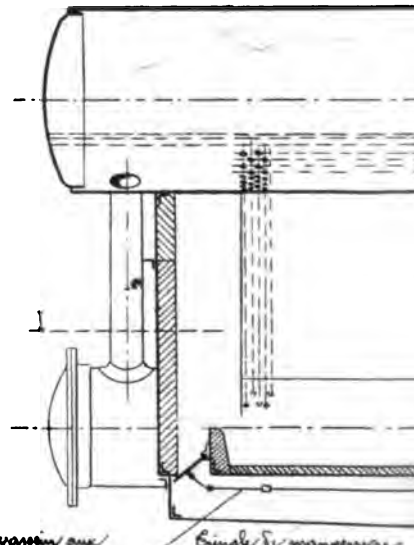
59. — *Dépense de gaz pour la pulvérisation. Choix à faire, entre la vapeur et l'air comprimé.* — Il importe beaucoup, au point de vue des avantages économiques attachés à l'emploi du pétrole, de produire la pulvérisation dans de bonnes conditions économiques.

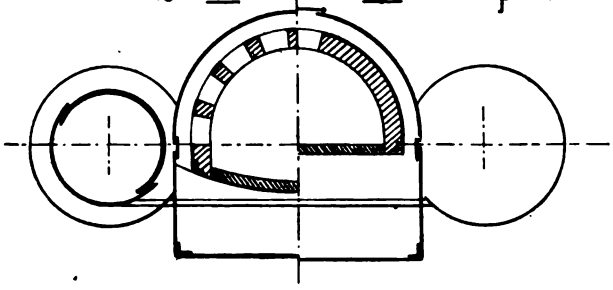
En général, la matière pulvérisante est la vapeur prise sur la chaudière même qu'il s'agit de chauffer. La dépense est extrêmement variable. Dans les premiers essais faits en France, en 1887, on employait $1^k,20$ de vapeur à pulvériser 1 kilogramme de pétrole ; plus tard, sur le *Buffle*, on a dépensé $0^k,75$ à 1 kilogramme, puis $1^k,2$ sur le torpilleur 22,

1/2 Coupe transversale CD *1/2 Vue de face*

Fig. 50







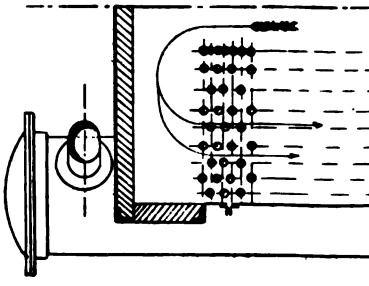
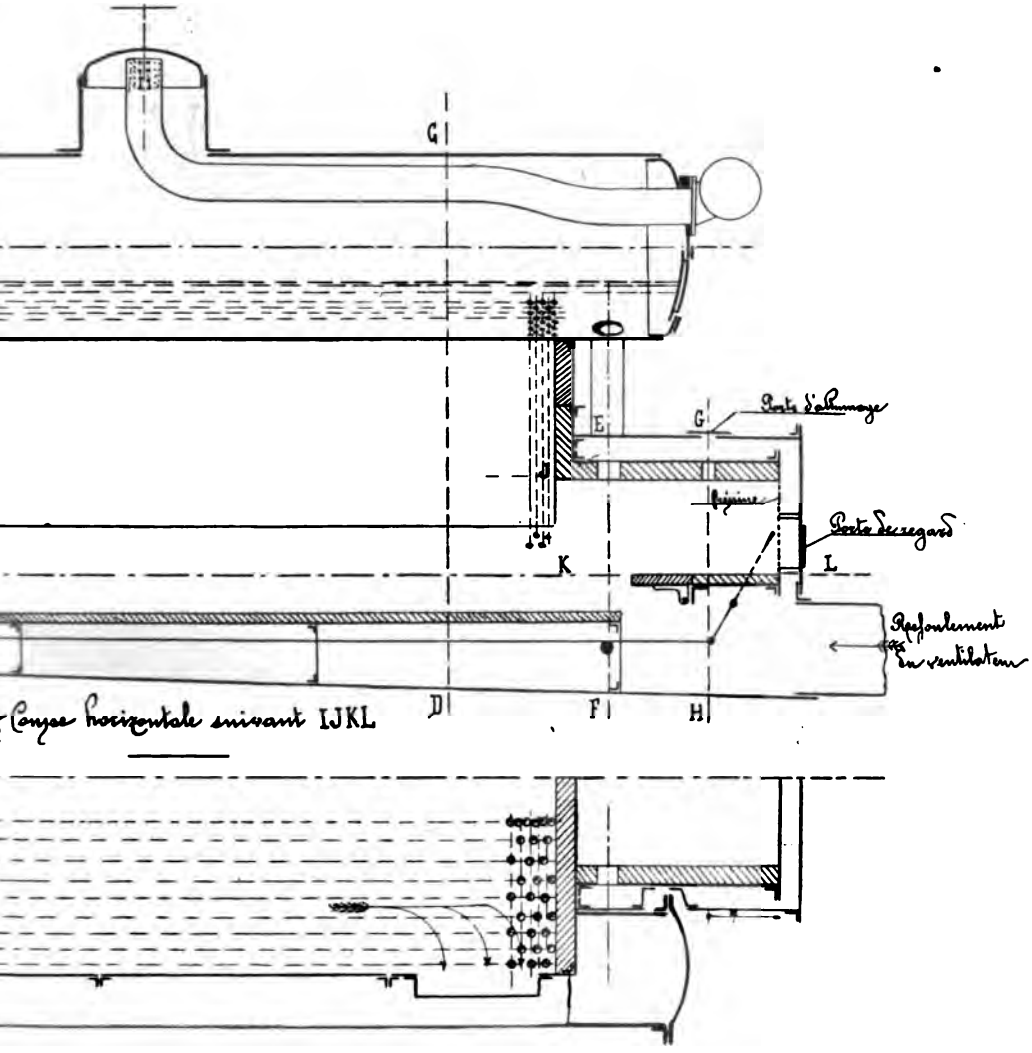


Fig. 50 *ter*

e Guyot

pe longitudinale suivant AB

Fig. 50 *bis*



Coupe horizontale suivant IJKL

Fig. 50 *quater*

enfin, de 0k,46 à 1k,15 sur la chaudière Godard, et 0k,53 et de 0k,75 dans les essais de 1893 sur une chaudière type locomotive. Ce sont là des chiffres trop élevés.

Dans les essais faits sur sa chaudière, en 1895, M. Guyot n'a pas dépassé 0k,63 et est descendu jusqu'à 0k,25 de vapeur par kilogramme de pétrole, en obtenant une bonne pulvérisation. En Italie, on a obtenu des résultats analogues, 0k,50 à 0k,25 ; on assure même être descendu à 0k,102 dans un essai sur un torpilleur Schichau. Quoi qu'il en soit de ce dernier chiffre, on peut affirmer du moins que la pulvérisation n'exige pas une dépense de vapeur supérieure à la moitié du poids du pétrole, ce qui est une dépense presqu'insignifiante pour les machines fixes ayant l'eau douce à discrétion. Dans les machines marines, l'eau douce doit être remplacée à l'aide des bouilleurs ; cela double, et au-delà, la dépense, avec les bouilleurs imparfaits qui sont souvent en usage.

La vapeur peut être remplacée par de l'air comprimé. Cette substitution est théoriquement avantageuse, comme dans le tirage induit, parce que la vapeur, en raison de sa faible densité, peut comprimer à sa pression un poids d'air très supérieur au sien, et que la force pulvérisatrice dépend de la quantité de mouvement du jet, indépendamment de toute question de volume. Il reste à savoir si le bénéfice réalisé paie au delà du travail des résistances passives dans l'appareil de compression, ce qui ne peut être établi que par expérience. Les premiers essais faits en France, qui remontent à 1887, furent jugés défavorables à l'air comprimé par une commission, qui semblait, du reste, avoir une opinion arrêtée à l'avance. On est revenu depuis lors, sur cette appréciation ; un ensemble d'expériences plus récentes paraît établir, malgré quelques anomalies, que la dépense peut être réduite de moitié, quand on emploie la vapeur à comprimer de l'air avec un appareil soigné, au lieu de la lancer directement dans le pulvérisateur. S'il s'agit d'une machine marine, l'emploi du compresseur d'air supprimant la perte d'eau douce, la dépense de vapeur se trouve réduite au quart de ce qu'elle serait dans un pulvérisateur à vapeur.

Les difficultés de l'allumage sont les mêmes dans les deux cas, soit avec les pulvérisateurs à vapeur, soit avec ceux à air. Il faut disposer d'une source auxiliaire de vapeur pour alimenter les jets, ou pour faire fonctionner le compresseur d'air, jusqu'à ce qu'on ait obtenu de la pression. Quand on ne dispose pas d'une semblable source de vapeur, il faut recourir à un appareil d'allumage spécial, soit un brûleur à auget, soit un pulvérisateur par simple compression alimenté par une pompe à bras.

La pulvérisation par l'air écarte le danger des crachements et même

des extinctions de brûleurs, qui se produisent avec la vapeur, dans le cas d'entrainement d'eau.

60. — *Rendement du pétrole en eau vaporisée.* — La combustion du mazout développe 11.000 calories par kilogramme, tandis que le charbon n'en développe que 9.000; la puissance de vaporisation du combustible liquide a donc la supériorité dans le rapport 1,22, les conditions de la combustion étant supposées les mêmes.

Les conditions de la combustion du combustible liquide, dans le jet pulvérisé, sont beaucoup plus favorables pour obtenir une combinaison chimique parfaite, même en économisant sur l'excès d'air, qui emporte 10 % de la chaleur produite avec les grilles chauffées au charbon.

Enfin, la chauffe au pétrole, constamment réglée, ne connait ni les chargements, ni les décrassages, ni les mises bas des feux, qui entraînent avec la chauffe au charbon des pertes importantes.

On voit, en somme, que le mazout présente, par rapport au charbon, des avantages économiques sérieux, qui ne peuvent être déterminés, d'ailleurs, que par l'expérience. Dans les chiffres qui vont suivre, nous indiquerons les quantités brutes de vapeur obtenues par kilogramme de pétrole, sans tenir compte de la dépense nécessaire pour produire la vaporisation; il est facile de faire la correction de cette dépense d'après ce qui a été dit au numéro précédent.

M. D'Allest, qui a été le premier ou l'un des premiers à essayer en France la chauffe au pétrole, a obtenu, en 1887, jusqu'à $11^k,33$ de vapeur par kilogramme de mazout, au tirage forcé le plus actif des torpilleurs, avec 78 kilogrammes de vapeur produite par mètre carré de surface de chauffe. On a tâtonné quelque temps, dans la marine de guerre, avant d'arriver à de semblables résultats; mais, en 1890, sur le torpilleur 22, on a vaporisé $11^k,36$, et même, une fois, jusqu'à $13^k,25$ d'eau. Sur la chaudière Godard transformée, on n'a obtenu que $9^k,6$, c'est-à-dire à peu près autant qu'avec du charbon, si l'on tient compte de la dépense de pulvérisation; mais c'est là un pur accident. M. Guyot, sur sa chaudière, a vaporisé, en 1895, respectivement $12^k,5$, $12^k,0$, $11^k,3$, aux pressions d'air de 8, 17 et 45 millimètres, dans le vase clos.

En somme, une vaporisation de 12 kilogrammes d'eau avec le mazout paraît être aussi facilement réalisable qu'une de 9 kilogrammes avec le charbon; c'est en faveur du mazout, une supériorité dans le rapport 1,33, dont 1,22 pour la différence de puissance calorifique, et 0,11 pour la meilleure combustion. M. le colonel Nabor Soliani, du Génie maritime italien, un des principaux initiateurs dans l'emploi du pétrole, a trouvé une supériorité dépassant de beaucoup 1,33, sur un torpilleur

qui consommait 0k,95 de charbon par cheval, et qui, après transformation, a consommé 0k,56 de pétrole seulement.

61. — *Avantages divers de la chauffe au pétrole.* — *Son avenir.* — Les avantages du pétrole, au point de vue économique, sont loin de se limiter à une supériorité de puissance vaporisatrice de 30 %, déduction faite de la dépense pour la pulvérisation à l'air comprimé. La simplicité même des opérations a une grande importance, puisque la tâche des soutiers et chauffeurs est, non pas simplifiée, mais bien supprimée, et que, par suite, les dépenses de personnel sont réduites presque à rien.

A côté de l'économie de main-d'œuvre et de poids de combustible, il existe, en faveur du combustible liquide, d'autres éléments de supériorité dès à présent constatés. L'installation du tirage en vase clos est facilitée, par la suppression des chauffeurs et même de la chambre de chauffe; l'installation des feux et le réglage des pulvérisateurs se faisant à travers la cloison, le système se réduit à celui du cendrier clos dans lequel on n'aurait plus de portes de foyers à ouvrir. La grande régularité de la chauffe fait disparaître, pour les chaudières, les causes de fatigue résultant, par exemple, de l'ouverture des foyers au moment du chargement; de là, possibilité d'obtenir, sans danger, des vaporisations plus actives, ou bien accroissement de durée des chaudières. Les feux sont toujours propres, toujours en bon état, ce qui donne un accroissement notable de puissance moyenne, car, sur les chaudières chauffées au charbon, la puissance d'un foyer diminue beaucoup à l'approche du décrassage, et tombe à rien pendant le décrassage. Avec un bon réglage des pulvérisateurs, on supprime la fumée. Enfin, les manœuvres d'embarquement de combustible sont extrêmement simplifiées. Les avantages au point de vue de la propreté générale des bâtiments ne sont pas non plus à dédaigner.

L'obstacle qui s'oppose actuellement à l'extension de l'emploi du mazout est dans son prix. Le mazout, en France, revient à peu près au double du prix du charbon, en laissant de côté les frais de douane. Il y a, il est vrai, de larges compensations, car les dépenses actuelles pour le personnel de chauffe ne sont pas de moins de 50 à 60 % du prix du charbon; ces dépenses seraient à peu près supprimées, et, d'autre part, l'accroissement de fret, ou la diminution de déplacement du navire, selon la manière dont on utiliserait l'économie de poids de combustible, paierait pour les 50 à 40 % de prix restant. Mais le prix actuel du mazout, simple conséquence des difficultés d'emploi rencontrées au début, s'élèverait très vite avec les demandes. De plus, nous n'avons parlé que du prix en Europe; le mazout, uniquement recueilli jusqu'ici à Bakou, ne

sort guère du bassin de la Méditerranée; son emploi est interdit aux navires long courriers qui ne trouveraient pas à s'en ravitailler. Enfin, il est facile de s'assurer que la production totale de mazout est actuellement une fraction minime de ce qu'il faut de combustible à l'ensemble des diverses marines; c'est là un motif absolu pour que son emploi reste quant à présent très limité.

Les premières applications importantes du chauffage au mazout seul se feront vraisemblablement sur les torpilleurs.

Plus tard, si de nouveaux districts pétrolifères viennent à se découvrir dans diverses parties du monde, et surtout si les gisements se trouvent être des usines de production d'une puissance illimitée, c'est-à-dire si l'hypothèse de M. Mendelejeff, sur le formation du pétrole, vient à se confirmer, la question changera totalement; le combustible liquide détrônera alors tout à fait le charbon, même s'il faut se résigner à l'emploi d'huiles offrant, dans leur maniement, moins de sécurité que le mazout.

62. — *Chauffage mixte.* — *Son utilité.* — Sur les grands navires, où il n'est pas question d'appliquer le chauffage au pétrole seul, on peut réaliser quelques-uns des avantages pratiques les plus immédiats de ce chauffage, en disposant dans les foyers un couple de petits brûleurs, et en lançant occasionnellement des jets de pétrole pulvérisé au-dessus des grilles chargées de charbon incandescent.

Le but principal du chauffage mixte, dans cette nouvelle combinaison, est de pousser rapidement les feux, d'obtenir à volonté un notable accroissement de puissance des chaudières, la combustion du pétrole ne faisant aucun tort à celle du charbon, et surtout de pouvoir marcher dans des conditions encore favorables, avec des grilles couvertes de mâchefer, en remettant à plus tard l'opération du décrassage.

La question du rendement du pétrole en eau vaporisée n'a qu'une importance très secondaire dans le chauffage mixte : il est cependant nécessaire de connaitre ce rendement, ne fût-ce que pour se rendre compte de la manière dont s'opère la combustion.

63. — *Rendement comparatif des deux combustibles dans le chauffage mixte.* — Il faut remarquer, tout d'abord, que les jets de pétrole ajoutés dans le foyer modifient les conditions de combustion et de rendement du charbon, en brassant la flamme et en brûlant l'excès d'air introduit; on ne doit donc pas considérer la puissance vaporisatrice du charbon comme restée la même, quand on passe du chauffage ordinaire au chauffage mixte. Ceci admis pour le principe, on considère, en fait,

la quantité d'eau vaporisée par kilogramme de charbon comme une constante, et on porte à l'actif du pétrole, en addition à son action vaporisatrice directe, l'influence qu'il a sur la puissance vaporisatrice du charbon.

Soit, pour une chaudière donnée, a la quantité d'eau vaporisée par kilogramme de charbon dans la chauffe ordinaire et b la quantité de vapeur par kilogramme du mélange de charbon et de pétrole dans le chauffage mixte; soit p le poids de pétrole dépensé en même temps qu'un poids c de charbon; soit enfin x la quantité d'eau vaporisée par kilogramme de pétrole dans le chauffage mixte. La vapeur produite par le poids $p+c$ du mélange est, dans l'hypothèse adoptée sur la constance de a, égale à

$$px + ca;$$

nous avons donc, pour un kilogramme du mélange :

$$\frac{px + ca}{p + c} = b,$$

ce qui donne :

$$x = \frac{b\,(p+c) - ca}{p} = b + \frac{b-a}{\frac{p}{c}}.$$

Si nous appelons R le rapport du rendement du pétrole à celui du charbon, nous trouvons :

$$R = \frac{x}{a} = \frac{b}{a} + \frac{\frac{b}{a} - 1}{\frac{p}{c}}.$$

Il n'a été fait qu'un assez petit nombre d'expériences de vaporisation, successivement au charbon seul et au chauffage mixte, sur une même chaudière; du moins très peu de résultats ont été publiés. Sur le *Furieux*, après une expérience au charbon seul, brûlé à raison de 92 kilogrammes par heure et par mètre carré de grilles, on en a fait deux au chauffage mixte avec des proportions différentes de pétrole, en brûlant 104 kilogrammes et 106 kilogrammes du combustible mixte. Les trois essais, ainsi exécutés dans des conditions bien comparables, donnent :

$\frac{p}{c}$	a	x	$\frac{x}{a}$
0,00	9k,05	»	»
0,45	9 ,05	11k,34	1,25
0,64	9 ,05	14 ,12	1,56

Dans la dernière expérience, le rendement du pétrole a été plus élevé que dans les chauffes au pétrole seul; c'est ce qui doit arriver, avec un chauffage mixte bien disposé; mais ce n'est pas ce qui arrive toujours. Dans une expérience au chauffage mixte, à Cherbourg, sur la chaudière Godard transformée, avec un tirage forcé trop énergique et des jets mal disposés dans le foyer, le rendement *b* du combustible mixte s'est même montré inférieur au rendement *a* du charbon seul.

Si les essais de vaporisation sont rares, par contre les essais de fonctionnement de machines, donnant les consommations par cheval, soit de combustible mixte, soit de charbon, sont assez nombreux. Ces essais peuvent servir comme les premiers, à comparer les deux combustibles, en faisant toujours la même hypothèse que précédemment sur la constance du pouvoir calorifique du charbon. Soit C la consommation par cheval, de charbon seul; soient c et p les consommations, par cheval, de charbon et de pétrole; la quantité de pétrole p tient lieu de la quantité de charbon C—c, pour produire un cheval pendant une heure, et lui est par conséquent équivalente; le rendement calorifique étant en raison inverse de la quantité du combustible nécessaire pour produire un travail donné, dans les hypothèses simples où nous nous tenons, nous avons :

$$R = \frac{C - c}{p};$$

Cette formule n'est applicable que si les deux expériences, au charbon seul et au chauffage mixte, ont été faites à des tirages forcés modérés. En général, les grands tirages forcés ne sont pas favorables à l'emploi du pétrole, et le rapport de p à c doit être réduit à mesure que la chauffe est plus intense, si l'on veut que le rendement R reste supérieur à 1, c'est-à-dire que l'emploi du chauffage mixte donne une économie de combustible. Il existe évidemment, pour chaque intensité de tirage, une proportion entre p et c qui correspond à la valeur minimum de la consommation totale $p + c$ par cheval, et une autre proportion qui convient pour développer la plus grande puissance totale possible. Il n'a pas été fait d'expériences assez complètes pour établir à cet égard les lois du tirage mixte; on peut cependant consulter avec intérêt le tableau suivant, résumé des expériences faites sur le torpilleur 109, avec une chaudière locomotive.

	1re SÉRIE			2e SÉRIE			3e SÉRIE
Pression d'air. . . .	15mm	13mm	12mm	25mm	26mm	29mm	50mm
Charbon seul . . . C.	1k,337	1k,337	1k,337	1k,354	1k,354	1k,354	1k,506
Charbon. . . . . c.	0 ,979	0 ,914	0 ,581	0 ,713	0 ,721	0 ,652	1 ,219
Pétrole . . . . . p	0 ,379	0 ,388	0 ,494	0 ,405	0 ,474	0 ,655	0 ,434
Total. . . . p + c.	1 ,358	1 ,302	1 ,075	1 ,118	1 ,195	1 ,307	1 ,653
$R = \frac{C - c}{p}$	0 ,94	1 ,09	1 ,53	1 ,58	1 ,33	1 ,07	0 ,66

Ce tableau indique que l'on peut espérer de bons résultats du chauffage mixte, au tirage naturel ou légèrement forcé, en brûlant un peu moins de pétrole que de charbon. Ainsi, au tirage naturel, en brûlant 80 kilogrammes de charbon par heure et mètre carré de grilles, et ajoutant 60 kilogrammes de mazout, avec un rendement égal à 1,5, on aurait la même puissance qu'avec une combustion de 170 kilogrammes de charbon. Dans ces conditions, le chauffage mixte peut tenir lieu du tirage forcé, sur lequel il a de grands avantages.

Les expériences faites sur divers bâtiments, le *Papin*, le *Surcouf*, le *Forbin*, bien que favorables, n'ont pas donné en général un résultat aussi nettement prononcé qu'on aurait pu l'espérer. Sur le *Milan*, avec des chaudières Belleville, le chauffage mixte a eu peu d'efficacité ; la proportion de pétrole brûlé était, il est vrai, très faible. Sur le *Surcouf*, au contraire, après un essai au charbon seul, où l'on avait atteint pour 1.400 chevaux développés la consommation extraordinaire de 1k,85 par cheval, on a réalisé au chauffage mixte une puissance peu inférieure 1.200 chevaux, en brûlant 0k,96 seulement de combustible mixte.

Les essais de chauffage mixte se poursuivent de tous côtés et particulièrement dans la marine italienne.

64. — *Applications diverses du pétrole à la navigation.* — Nous n'avons pas à parler, au sujet des chaudières, des appareils dans lesquels on se passe de chaudières, en faisant brûler le pétrole dans les cylindres mêmes de la machine ; les moteurs à pétrole, d'ailleurs, qui ont tant d'applications à terre, n'ont pas encore trouvé place à bord des navires, même pour les appareils auxiliaires.

Depuis quelques années, on a fait de nombreuses applications sur les très petits bâtiments, yachts ou chaloupes à vapeur, d'un appareil dans lequel le pétrole sert à la fois de combustible et de liquide à vaporiser. La machine et la chaudière sont renfermées dans une même boite

étanche. La vapeur de pétrole, au sortir des cylindres où elle a travaillé sur les pistons, s'échappe dans l'enveloppe renfermant les bielles et les paliers, et y sert de graissage automatique et continu. Ces machines, dues à M. Escher-Wyss de Zurich, mériteraient une étude très attentive, pour déterminer l'économie de combustible, qui correspond à la chaleur latente de vaporisation et au poids spécifique de vapeur de l'huile minérale comparés, à ceux de l'eau ; la chaleur de vaporisation des carbures d'hydrogène est huit ou dix fois plus faible que celle de l'eau.

A côté de l'extension donnée à l'emploi du pétrole, dans les appareils qui précèdent, il faut citer quelques applications, qui sont au contraire des restrictions par rapport aux modes de chauffage que nous avons étudiés. Ces applications consistent dans l'emploi de briquettes au pétrole, destinées à faire utiliser la puissance calorifique plus grande du pétrole, sur des grilles semblables à celles destinées à la combustion du charbon. Diverses expériences, faites à Toulon sur les briquettes de M. Maëstracci et sur celles de la Compagnie des combustibles intensifs, n'ont pas réalisé les espérances que l'on avait conçues tout d'abord. Il semble d'ailleurs que les principales qualités du pétrole, comme combustible, étant inhérentes à l'état liquide, ce n'est pas du côté de l'emploi du pétrole solidifié que les recherches doivent se diriger.

CHAPITRE VI

§ 1. — Production de la chaleur.

65. — *Rendement calorifique total des chaudières. Sa décomposition en rendement de la combustion et utilisation de la chaleur.* — Le rendement calorifique des chaudières d'essai se trouve déterminé par les expériences de recette des charbons, quand on suppose connu le pouvoir calorifique du combustible soumis à la combustion parfaite dans la bombe calorimétrique. Si, par exemple, on considère l'ancienne chaudière d'essai rectangulaire, qui vaporisait $8^{l},5$ d'eau à 2 kilogrammes de pression, par kilogramme de charbon brûlé, on trouve que le nombre de calories utilisées est de 5.380, en supposant l'eau d'alimentation à 10 degrés et le titre de la vapeur égal à 1 ; le pouvoir calorifique du charbon d'Anzin étant de 9.200 calories, le rendement de la chaudière est ainsi de 0,584. Avec la nouvelle chaudière, vaporisant $9^{l},6$ d'eau à 8 kilogrammes de pression, le rendement serait, dans les mêmes conditions, de 0,676. En tenant compte de ce que la vapeur produite dans une chaudière cylindrique contient environ 4 % d'eau, on peut fixer aux environs de 0,65 le rendement des chaudières tubulaires actuelles. Pour une chaudière quelconque, le rendement calorifique peut se déterminer, par une expérience de vaporisation analogue aux essais de recette des charbons.

Le rendement d'une chaudière est le produit de deux facteurs bien distincts, exprimant, le premier, le degré de perfection de la combustion dans le foyer et la boîte à feu, le second, l'utilisation de la chaleur produite.

La combustion dans une chaudière, même en négligeant le charbon perdu avec les escarbilles, ne peut jamais être aussi complète que dans l'oxygène pur de la bombe colorimétrique, parce que la flamme est toujours éteinte trop tôt par le refroidissement. Il est généralement admis qu'une chaudière ne peut guère tirer du charbon plus de 7.800 calories au lieu de 9.200, ce qui donne 0,85 pour le premier facteur du rendement. Sur ce point, on n'a que les indications fournies par l'analyse des gaz de la cheminée. Il est vraisemblable que sur certaines chau-

dières tubuleuses à chambre de combustion très réduite, le chiffre qui précède n'est pas atteint.

La proportion de chaleur utilisée peut être évaluée, quand on connaît la température de combustion et celle des gaz au pied de la cheminée. Si par exemple la combustion s'opère à 1.600 degrés, ce qui est un maximum, et si les gaz sortent à 300 degrés, ce qui est un minimum pour les températures d'eau et de vapeur de 200 degrés, il y a une perte de chaleur de $\frac{3}{16}$ ou 18,75 %, non compris la chaleur latente de la vapeur d'eau dans la fumée. Les gaz sortent souvent à 350, à 400 degrés, et même au delà. Il est à remarquer que la perte par la cheminée est d'autant plus grande que la température de combustion est plus basse, c'est-à-dire que l'on fournit au charbon un plus grand excès d'air en vue d'arriver à une combustion plus complète.

A la perte par les gaz chauds de la cheminée, s'ajoute une perte par rayonnement et conductibilité difficile à évaluer, mais qui peut descendre à 5 % sur une chaudière tubulaire bien feutrée ; il y a ensuite la chaleur emportée par les escarbilles que l'on retire du cendrier. L'utilisation totale de la chaleur peut être estimée à 0,75.

Le produit des deux facteurs 0,85 et 0,75 donne bien, pour le rendement calorifique total, la valeur de 0,65 indiquée plus haut pour la chaudière tubulaire employée aux essais de charbon.

Dans les chaudières tubuleuses, le rendement à la combustion varie beaucoup suivant les modèles. D'autre part, l'utilisation a été quelquefois très faible, car on a souvent vu rougir les culottes de cheminée. De grands progrès ont été réalisés sous ces deux rapports, sans qu'il soit possible encore de réunir des données d'une application générale. Voici, pour une chaudière modèle Mosher expérimentée en Amérique, les chiffres qui ont été publiés concernant l'utilisation :

Chaleur utilisée à vaporiser l'eau	76,0
Chaleur perdue par les gaz de la cheminée.	13,0
Chaleur perdue par le rayonnement des enveloppes . .	9,1
Chaleur perdue par les escarbilles et la vaporisation d'eau dans les cendriers (non compris la perte de charbon).	1,9
Chaleur totale de la combustion	100,0

Le rayonnement est plus fort et plus difficile à combattre dans les chaudières tubuleuses que dans les tubulaires.

66. — *Quantité d'air nécessaire à la combustion du charbon. Perte de chaleur due à un excès d'air.* — La quantité d'air théoriquement nécessaire à la combustion d'un kilogramme de houille se calcule facilement,

quand la composition chimique de cette houille est connue. Supposons une proportion de 0,85 de carbone pur et de 0,05 d'hydrogène, le reste se composant de matières inertes, oxygène compris. L'air atmosphérique renfermant 8k,3 d'oxygène par mètre cube, il faut 8m3,9 d'air pour la combustion complète de 1 kilogramme de carbone, et 26m3,6 d'air pour la combution de 1 kilogramme d'hydrogène. Le charbon considéré demande donc 7m3,56 d'air pour son carbone, et 1m3,33 pour son hydrogène, soit en tout 8m3,89, par kilogramme brûlé.

La manière dont la combustion s'opère sur les grilles, qui sera décrite plus loin, exige le passage d'une quantité d'air, très supérieure à la précédente, sur laquelle on est loin d'avoir des indications précises. Des expériences faites en 1873 à Indret, avec l'ancienne chaudière d'essai et au tirage naturel, ont fourni à M. Joëssel les chiffres suivants :

Charbon brûlé par heure et mètre carré de grilles	74k	89k	103k	126k
Vitesse de l'air à travers la porte des cendriers .	4m,45	4m,45	4m,05	3m,97
Volume d'air fourni par kilogramme de charbon .	23m3,0	19m3,2	15m3,0	12m3,1

Une autre série d'essais, faite en 1877 à bord de la *Résolue*, avec une chaudière tubulaire cylindrique, m'a donné des résultats, qui sont plus étendus, parce qu'ils s'appliquent au tirage naturel et au tirage forcé. Le premier essai est au tirage naturel, les suivants au tirage activé par des jets d'air lancés dans la cheminée. Les vitesses d'air dans les cendriers sont déduites de la vitesse mesurée en divers points d'une porte unique d'entrée d'air à la chambre de chauffe.

Charbon par mètre carré de grilles.	96k,0	140k,5	159k,4	179k,0	197k,0
Dépression dans la boîte à fumée .	8mm,1	13mm,1	14mm,8	16mm,2	17mm,6
Vitesse d'air dans les cendriers. .	3m,20	3m,88	4m,02	4m,32	4m,49
Volume d'air par kilog. de charbon.	22m3,7	18m3,8	17m3,6	16m3,4	15m3,5

D'après ces chiffres, le rapport de la quantité d'air fournie à la quantité théoriquement nécessaire est, en nombres ronds, 2,5 au tirage naturel pour une combustion de 100 kilogrammes, 2 au tirage forcé pour une combustion de 150 kilogrammes, et 1,75 pour une combustion de 200 kilogrammes. Le tirage forcé a été poussé depuis lors à des intensités beaucoup plus grandes ; mais la consommation d'air n'a pas été observée.

L'utilité, au point de vue d'une bonne combustion, de l'excès d'air, que le jeu naturel du tirage appelle ainsi dans les foyers, est depuis longtemps établie. On a même trouvé de sérieux avantages à ouvrir des entrées d'air directes au-dessus des grilles. Ces rentrées d'air, qui sont ménagées, partie dans les portes de foyer, partie dans les autels, dimi-

nuent un peu le tirage ou dépression au-dessus de la grille, et par conséquent le passage d'air à travers le charbon et la quantité de charbon brûlé; mais, par l'amélioration de la combustion, elles accroissent sensiblement le rendement calorifique du combustible, et, en définitive, la puissance de la chaudière. La vitesse d'accès au foyer, pour l'air qui n'a pas à traverser la couche de charbon, atteint facilement 12 à 15 mètres au tirage naturel; il suffit donc de très petites ouvertures au-dessus des grilles. Sur les chaudières cylindriques à retour de flamme, on paraît être dans des conditions favorables en admettant au-dessus des grilles le tiers de la quantité d'air totale, c'est-à-dire la moitié de ce qui traverse les grilles.

La présence de l'air non utilisé dans la combustion, qui traverse la chaudière et s'évacue par la cheminée, est une cause de perte de chaleur importante. La chaleur spécifique des gaz à pression constante étant de 0,23 environ, tout mètre cube d'air, admis en excès par kilogramme de charbon et évacué à 300 degrés, emporte avec lui,

$$1^k,3 \times 300 \times 0,23 = 89,7 \text{ calories.}$$

Soit plus de 1 % de la chaleur produite.

La combustion de 1 kilogramme de charbon par 15 mètres cubes ou $19^k,5$ d'air produit $20^k,5$ de gaz à la chaleur spécifique de 0,23, abstraction faite du refroidissement immédiat; la température de la flamme est donc de 1.650°, si la quantité de chaleur produite est de 7.800 calories. Les $20^k,5$ de gaz évacués par la cheminée à la température de 300° emportent avec eux 1.474 calories, soit 18,9 % de la chaleur produite; c'est à peu près ce que nous avons trouvé plus haut.

67. — *Combustion du charbon; réactions chimiques*; *température de la flamme.* — Considérons maintenant ce qui se passe sur la grille recouverte d'une couche de charbon d'épaisseur uniforme. La quantité de charbon, qui est brûlée par heure et par mètre carré, dépend de la quantité d'air qui traverse la couche de charbon et de l'épaisseur de cette couche.

Pour une épaisseur de charbon donnée, la combustion croît naturellement avec l'intensité du tirage; l'expérience indique qu'elle est à peu près proportionnelle au volume d'air fourni, tant qu'on reste dans les limites du tirage naturel. La perfection de la combustion et la composition des gaz produits seraient ainsi constantes.

Pour une quantité d'air donnée, la combustion croît avec l'épaisseur de la couche de charbon, jusqu'à la limite fixe où cette épaisseur est suffisante pour faire absorber par le charbon la totalité de l'oxygène contenu dans l'air. Cette limite est atteinte dans les gazogènes, d'où il

ne sort que de l'oxyde de carbone et pas d'acide carbonique; mais on n'en approche pas sur les grilles des chaudières, et il importe de n'en pas approcher, puisqu'on ne veut produire que de l'acide carbonique.

Passons au cas du tirage forcé, et supposons que l'on se propose de brûler par heure une quantité de charbon déterminée; ce sont là les conditions habituelles de la chauffe. L'épaisseur de la couche se trouve implicitement fixée, car elle s'arrêtera d'elle-même au point qui donnera une combustion égale au chargement de charbon. Il faut, en principe, que la quantité de charbon chargée soit inférieure à une limite, au-dessus de laquelle le foyer s'engorgerait. Comme la quantité d'air, qui traverse la couche pour un tirage donné, diminue, quand l'épaisseur de la couche augmente, l'engorgement se produit avec rapidité, dès que l'épaisseur de charbon correspondant à la combustion maximum est dépassée; une diminution de débit d'air coïncide, en effet, avec l'accumulation du charbon en excès. Il n'a pas été fait d'observations exactes sur les épaisseurs qui donnent la combustion maximum; en pratique on ne dépasse jamais 15 à 20 centimètres d'épaisseur moyenne sur les navires, pour des combustions de 100 à 200 kilogrammes; on peut aller à 20 centimètres aux grands tirages forcés. Les chauffeurs habiles maintiennent plutôt des épaisseurs faibles, ainsi qu'il a été exposé et expliqué plus haut.

La combustion se fait de la manière suivante. La surface inférieure du charbon reçoit le courant d'air, et elle est le siège d'une combustion très active, où il ne se produit que de l'acide carbonique; la température atteint 1.600° au moins; la couleur est rouge blanc. Plus haut le courant gazeux contient une proportion croissante d'acide carbonique qui se décompose au contact du charbon incandescent,

$$CO^2 + C = 2\,CO.$$

En même temps, la combustion se continue aux dépens de l'oxygène encore contenu dans les gaz, mais en donnant de l'oxyde de carbone, dès que l'oxygène cesse d'être en excès. La température correspondant à ces réactions est beaucoup moins élevée que la précédente. Plus haut, l'air, de plus en plus dépouillé d'oxygène, rencontre le charbon nouvellement chargé; là se distillent les carbures volatils d'hydrogène, en longs filets gazeux, dans lesquels la disposition, favorable à la combustion, des lampes à double courant d'air fait totalement défaut; la température baisse encore. A la surface supérieure de la couche de charbon, les flammes se brassent d'ordinaire en s'infléchissant, ce qui multiplie les contacts entre l'oxygène restant et les gaz combustibles, oxyde de carbone et hydrogène carboné; en même temps un nouvel afflux d'air

se produit par les trous des portes de foyers; la combustion reprend une vive intensité, et la flamme un grand éclat.

Si l'on veut suivre ce qui se passe dans la flamme à une certaine distance de la grille, il n'est plus possible de formuler de règle générale, s'appliquant aux divers systèmes de chaudières. Une chambre de combustion assez large, où les flammes se brassent avant d'entrer en contact avec les surfaces refroidissantes, est indispensable pour une bonne combustion. Cette chambre se rencontre sur les chaudières cylindriques à retour de flamme, et cependant l'abondance de la fumée, au moment du chargement, et la formation de la suie dans les tubes prouvent que les hydrogènes carbonés ne sont brûlés que d'une manière imparfaite. Sur les chaudières cylindriques à tubes directs, les conditions sont évidemment moins bonnes. Sur beaucoup de modèles de chaudières tubuleuses, en particulier les Belleville et les Niclausse, la chambre de combustion est réduite à très peu de chose; un excès d'air fourni par un tirage très actif est indispensable. Sur les modèles récents à circulation accélérée, on a beaucoup accru la hauteur du foyer, pour donner à la flamme l'espace nécessaire à son développement.

68. — *De la fumée et de son analyse.* — Le seul indice que l'on ait en général, sur la manière dont s'opère la combustion, est dans l'aspect de la fumée. Une fumée épaisse indique une combustion incomplète; elle a pour cause ordinaire le refroidissement trop brusque de la flamme, devançant le moment où les hydrogènes carbonés auraient pu brûler. L'analyse des gaz, qui se fait très facilement avec l'appareil de MM. Schlœsing et Orsat, fournit des données plus sûres, pouvant conduire immédiatement à des conclusions pratiques : si l'on trouve dans les gaz de la cheminée 1,5 à 2% d'oxyde de carbone, on peut affirmer que la couche de charbon est trop épaisse et que l'intensité de combustion est excessive, au point de vue du rendement, pour le tirage dont on dispose. Si la proportion d'oxygène dépasse 8%, on peut en conclure que la couche de charbon est trop mince, le tirage trop énergique, ou les rentrées d'air au-dessus de la grille exagérées. Si enfin on se trouve en présence, à la fois d'un excès d'oxyde de carbone et d'oxygène non brûlé, c'est que la chaudière elle-même est défectueuse et ne peut donner aucune marche économique, au degré du tirage employé.

En résumé, on vise à réaliser une intensité déterminée de combustion, en obtenant le meilleur rendement possible, l'intensité et le rendement étant d'ailleurs indépendants. D'autre part, on dispose de deux moyens d'action, l'épaisseur de la couche de combustible et l'intensité du tirage. Le problème est donc toujours théoriquement soluble, avec des chauffeurs exercés.

§ 2. — Transmission de la chaleur à l'eau et à la vapeur.

69. — *Transmission de la chaleur. Principes généraux sur la conductibilité.* — La transmission de la chaleur des gaz de la combustion à l'eau qui se vaporise, se fait à travers les parois de la chaudière et comprend trois phases :

1° Passage de la chaleur, du gaz chaud à la paroi ;

2° Traversée dans l'épaisseur de la paroi ;

3° Passage de la paroi à l'eau.

On a ainsi à considérer :

1° Une température des gaz T ;

2° Une température de la surface extérieure de la paroi T_1 ;

3° Une température de la surface intérieure de la paroi t_1 ;

4° Une température de l'eau ou de la vapeur saturée t.

Du reste, on connaît seulement la loi de la transmission à travers le métal, exprimée par la formule :

$$(1) \qquad Q = C\frac{\theta}{e},$$

Q étant le nombre de calories traversant par seconde l'unité de section de 1 mètre carré,

C le coefficient de conductibilité du métal,

θ la différence de température $T_1 - t_1$,

e l'épaisseur de la paroi en millimètres.

La valeur de C est assez bien connue pour les métaux ; on a :

	C
Fer.	16
Cuivre.	100
Argent	136

Les coefficients de conductibilité s'expriment souvent en prenant celui de l'argent pour unité.

On possède peu de données sur la conductibilité à travers les dépôts qui peuvent recouvrir les surfaces métalliques ; ces dépôts sont en général très mauvais conducteurs. La transmission entre les gaz et la paroi, puis entre celle-ci et l'eau, est régie par des lois inconnues ; on sait seulement qu'elle ne se fait pas par conductibilité proprement dite, les fluides conduisant très mal ; elle se fait par *convection*, c'est-à-dire par transmission successive à des molécules différentes du fluide, qui se succèdent au contact de la tôle ; elle exige par suite un brassage continu de ce fluide. On sait aussi qu'elle se fait beaucoup mieux entre l'eau et la paroi qu'entre les gaz et la paroi, 3.500 fois mieux selon M. Milton

du Lloyd ; ce dernier chiffre se justifie en partie seulement, par la différence entre les valeurs des conductibilités estimées à 0,00155 pour l'eau et à 0,000045 pour les gaz, celle de l'argent étant prise pour unité.

De la grande différence entre les transmissibilités à l'eau et aux gaz, quelle que soit d'ailleurs leurs valeurs véritables, il résulte que t_1 diffère infiniment moins de t que T_1 de T, et, comme d'ailleurs T_1 et t_1 diffèrent très peu l'un de l'autre, la température des parois des chaudières, dans les conditions normales, se rapproche de celle de l'eau. Toutes les causes, qui contrarient la transmissibilité à l'eau, font augmenter d'ailleurs t_1 et T_1.

Comme la valeur de θ, dans l'équation (1), est inconnue, cette équation ne peut être d'aucun secours, sinon pour calculer θ, lorsque Q est connu.

La seule différence de température que l'on puisse mesurer, au moins approximativement, est :

$$\Theta = T - t;$$

C'est donc en fonction de Θ seulement que l'on peut déterminer expérimentalement la valeur de Q. M. Blechynden a fait cette étude en Angleterre, avec une petite chaudière en contact, sur une surface constante, avec une flamme de température connue ; il mesurait T, t, et la quantité d'eau vaporisée, qui lui donnait la valeur de Q.

Les expériences, faites avec diverses natures de surface et diverses épaisseurs de métal, ont indiqué très régulièrement la loi :

$$Q = K\,\Theta^3 \qquad (2)$$

K étant constant pour une même paroi, quel que soit Θ.

La formule (2) étant admise, il est facile de trouver la valeur de K, pour l'ensemble des parois d'une chaudière dont le fonctionnement est connu.

Reprenons la chaudière où chaque kilogramme de charbon produit 7.800 calories réparties sur $20^k,5$ de gaz à 1.600 degrés qui sortent à 300 degrés en emportant 1.474 calories, et supposons l'eau et la vapeur à 200 degrés. Supposons enfin la combustion égale à 100 kilogrammes par mètre carré de grilles, et la surface de chauffe égale à 40 fois la surface de grilles ; le problème se trouve entièrement déterminé.

Pour une quantité Q de chaleur transmise par une surface de 1 mètre carré, il passe, à travers une surface ds, une quantité $Q\,ds$; l'abaissement $d\Theta$ qui en résulte pour la température des $20^{m^2},5$ de gaz, en tenant compte de leur chaleur spécifique 0,23, est :

$$d\Theta = \frac{Q\,ds}{20,5 \times 0,23} = \frac{Q\,ds}{4,715};$$

Remplaçant Q par sa valeur K Θ^4, nous avons :

$$d\Theta = \frac{K\,\Theta^4\,ds}{4{,}715},$$

$$\frac{d\Theta}{\Theta^2} = \frac{K}{4{,}715}\,ds,$$

$$(3) \qquad -\frac{1}{\Theta} = \frac{K}{4{,}715}\,S + C,$$

équation dans laquelle S est égale à $0^{m^2}{,}4$, surface de chauffe, correspondant à la surface de grilles $0^{m^2}{,}01$ pour 1 kilogramme de charbon brûlé *par heure.*

Prenant l'intégrale entre les deux limites de Θ considérées, 1.400° et 100°, nous avons :

$$\frac{1}{100} - \frac{1}{1400} = \frac{K \times 0{,}4}{4{,}715},$$

qui donne :

$$K = 0{,}11$$

La quantité de chaleur, qui passe par heure et par mètre carré est donc :

$$(4) \qquad Q = 0{,}11\,\Theta^4,$$

en chaque point de la chaudière.

Dans le foyer, pour $\Theta = 1.400$ degrés, on a :

$$Q = 215.000 \text{ calories.}$$

A l'origine des tubes, pour $\Theta = 500$ degrés, on a :

$$Q = 27.500 \text{ calories.}$$

A l'extrémité des tubes, pour $\Theta = 100$ degrés, on a :

$$Q = 1.100 \text{ calories.}$$

A l'aide de ces valeurs de Q, on peut calculer les valeurs de θ, avec la formule (1), en ayant soin de diviser Q par 3.600, pour prendre la seconde comme unité de temps.

On trouve ainsi, dans le foyer, $\theta = 40$ degrés, en supposant une tôle de 12 millimètres d'épaisseur.

La loi (2) ou (3), en vertu de laquelle, pour une combustion modérée donnant un abaissement de température des gaz à 300 degrés, il n'y aurait guère d'avantage à accroître la surface de chauffe S, au delà de 40 ou 50 G, est d'accord avec les résultats d'expériences déjà anciennes.

M. Geoffroy, en 1860-64, a mesuré la puissance de vaporisation des différentes parties d'une chaudière de locomotive, composée de segments étanches placés bout à bout; la partie tubulaire, en particulier, se composait de quatre segments. A une chauffe modérée, correspondant à la combustion de 100 kilogrammes de charbon par heure et par

mètre carré de surface de grilles, les évaporations obtenues ont été de 452k dans le segment d'entrée et de 58k,2 seulement dans le segment de sortie des gaz ; le rapport entre ces deux nombres est égal à 8. Or, si nous supposons que la différence de température Θ variait régulièrement de 500 à 100 degrés dans les tubes, elle était en moyenne de 450 degrés dans le premier segment et de 150 degrés dans le dernier ; le rapport entre les deux Θ' était ainsi égal à 9. La vérification de la formule (4) paraîtra sans doute suffisante.

Des expériences plus complètes que celles de M. Geoffroy ont été faites depuis lors par la Compagnie P.-L.-M. Les principaux résultats sont indiqués dans une note à la fin du volume.

Pour les chaudières tubuleuses on sait, d'après une expérience de M. Watt, que, dans un modèle à circulation libre, la première rangée de tubes frappée par la flamme peut donner à elle seule 0,60 de la production totale de vapeur.

70. — *Influence de l'état de propreté des parois.* — La valeur numérique de K doit être infiniment variable selon les chaudières et surtout selon l'état de propreté des parois.

Dans des expériences faites par M. Blechynden, sur un récipient d'eau à surfaces polies, K a varié de 0,13 à 0,27 selon l'épaisseur de la paroi ; il était en moyenne 0,24 dans la formule appliquée aux unités anglaises, ce qui correspond à 0,19 en prenant les unités françaises. L'ensemble d'une chaudière ordinaire en bon état, foyer épais et tubes minces, ne laisse donc passer que

$$\frac{0.11}{0,19} = 0,58$$

de la quantité de chaleur, qui traversait les tôles décapées et généralement même rabotées de M. Blechynden. Dès que les tôles sont salies, soit par des dépôts calcaires, soit surtout par des dépôts graisseux, la transmission de la chaleur de la tôle à l'eau subit une diminution considérable, que l'on n'a pas les moyens de mesurer, mais qui s'accuse nettement par l'élévation de température de la tôle.

L'étude de l'échauffement des parois, quand l'eau ne peut plus les rafraîchir, et celle des inconvénients qui en résultent surtout au point de vue de la tenue des tubes, a été faite en 1893 par M. Durston *chief-engineer* à l'Amirauté, à la suite de diverses avaries de chaudières jusque là mal expliquées. Voici quelques chiffres fournis par ses expériences.

En chauffant de l'eau à l'air libre dans une coupelle en tôle de 13 millimètres d'épaisseur, sur un feu dont la température varie de 1.200 à 1.370 degrés, la température de la paroi du fond est de 138 degrés, quand la surface est propre ; elle atteint 154 degrés, quand on mêle à l'eau 5 %

d'huile minérale ; elle s'élève au-dessus de 270 degrés, quand on enduit le fond d'une couche graisseuse de $1^{mm},5$ d'épaisseur.

Quand l'isolement de la paroi est le résultat d'une production très abondante de bulles de vapeur, plus mauvaises conductrices encore que la graisse, le résultat est plus prononcé. Dans une chaudière d'essai à tubes directs, marchant au tirage forcé à 76 millimètres de pression d'eau, et brûlant 450 kilogrammes de charbon par heure et par mètre carré de grilles, M. Durston a mesuré la température de la plaque à tubes à l'aide d'alliages fusibles ; la température maximum de la flamme était de 1.700 degrés et celle de l'eau de 180 degrés. La température de la plaque a été trouvée de 570 degrés sur la surface extérieure et de 380 degrés au milieu de l'épaisseur. On voit, par ces chiffres, comment la production d'une chambre de vapeur sur la plaque à tubes peut amener un coup de feu.

Quand l'isolement est occasionné à l'extérieur de la paroi par un dépôt de fumée, le résultat devient tout à fait désastreux au point de vue de la transmission de la chaleur à l'eau, parce que l'obstacle ajouté se trouve du côté où la résistance était déjà excessive. Aussi la diminution de puissance des chaudières est-elle assez grande, dès que les dépôts de suie sont abondants, pour avertir de la nécessité de ramoner. L'isolement du côté de la flamme constitue d'ailleurs un préservatif pour la paroi ; c'est une cause de pertes de calories, mais non de dangers d'avaries.

71. — *Transmission de la chaleur par convection.* — La manière dont se transmet la chaleur entre les solides et les fluides, d'après ce qui a été dit, fait dépendre l'efficacité d'une surface de chauffe, de la manière dont se renouvellent les particules de fluide en contact avec elle. Par suite, l'efficacité d'une surface tubulaire est toute différente, selon qu'elle est frappée transversalement ou léchée longitudinalement par le courant gazeux ; dans le premier cas, il y a deux faces avant et arrière en contact, l'une avec le courant d'arrivée, l'autre avec le remous, la première absorbant beaucoup plus de chaleur que l'autre ; dans le second cas, l'absorption de chaleur est plus uniforme, mais l'absorption totale est moindre.

La disposition des chaudières tubuleuses, dans son ensemble, paraît favorable au point de vue de la convection, puisque les flammes se trouvent mieux brassées, surtout quand elles rencontrent des tubes placés en zigzag ; l'avantage peut toutefois se trouver dissimulé, à cause des difficultés de bien répartir les gaz chauds dans toute la section de passage entre les tubes.

L'infériorité inhérente à la disposition des tubes-carneaux, dans les

chaudières cylindriques, peut être diminuée de deux manières, soit par l'emploi des spirales Guébhard, lames métalliques tordues en spirales, qui se placent à l'intérieur des tubes pour dévier le courant et en faire porter successivement tous les filets contre les parois, soit par l'emploi des tubes Serve, qui portent des nervures intérieures allant puiser la chaleur jusqu'au centre du courant gazeux.

Pour favoriser la convection de la chaleur du côté de l'eau, on n'emploie pas, en général, d'autre moyen que l'activité de la circulation ; l'adoption des tubes Serve, comme tubes carneaux, dans les chaudières D'Allest, a cependant pour principal but de développer la surface de contact avec l'eau, en vue d'uniformiser le refroidissement du tube sur toutes ses génératrices. Le dégagement des bulles de vapeur assure du reste le renouvellement des surfaces en contact, pourvu que les bulles soient enlevées par le courant d'eau avec une vitesse suffisante. Le courant d'eau a besoin d'être plus rapide, dans les chaudières tubuleuses, en raison de ce que l'eau s'y présente en moindre volume par rapport à la vapeur dégagée par unité de temps.

L'agitation artificielle de l'eau dans les chaudières cylindriques et en particulier l'emploi des barboteuses sont évidemment favorables à la production de la vapeur.

72. — *Surface de chauffe et surface de grilles. — Rapport entre ces surfaces.* — La quantité d'eau qui se vaporise, par unité de temps et de surface, sur la paroi intérieure d'une chaudière, varie, comme nous avons vu, d'un point à l'autre de cette paroi.

Indépendamment des causes déjà indiquées, cette grande différence provient en partie du rayonnement de la chaleur, qui n'est pas très grand de la part des flammes, mais qui le devient de la part d'un combustible solide tel que le coke, et qui peut ainsi atteindre une valeur notable dans le foyer, quand on a été quelque temps sans charger. A ce point de vue, on divise la surface de chauffe en deux parties ; il y a la surface de chauffe directe et la surface de chauffe indirecte, la première étant celle qui regarde la grille. Une division analogue, mais moins précise, employée pour les chaudières cylindriques, est celle de la surface de chauffe directe comprenant foyers et boîte à feu, par opposition à la surface de chauffe tubulaire ; il n'y a plus ici qu'une différence dans les températures.

La convection, variable d'un point à l'autre, soit du côté de l'eau, soit du côté des flammes, exerce une grande influence ; les ciels de foyer au-dessus des autels sont soumis, de ce chef, à un échauffement particulièrement intense, à cause de la rapidité du mouvement des gaz.

Enfin et surtout, l'efficacité de la surface de chauffe diminue rapidement à mesure qu'on s'éloigne du foyer; elle diminue tellement qu'au delà d'une certaine limite l'addition d'une nouvelle surface de chauffe n'ajoute rien à la puissance de vaporisation, comme l'a montré l'expérience de M. Geoffroy citée plus haut.

On admet en général que, pour les chaudières destinées à marcher au tirage naturel, la surface de chauffe doit être égale à 35 fois la surface de grilles ; dans cette surface, les tubes entrent pour les quatre cinquièmes. Cette proportion convient bien pour les combustions de 60 à 110 kilogrammes ; on peut même aller jusqu'à 160 kilogrammes et vaporiser encore $8^{k},5$ d'eau par kilogramme de charbon, si la propreté de la chaudière est suffisante.

On peut admettre qu'étant données la surface de chauffe S et la surface de grilles G, l'activité de la combustion qui correspond à une bonne utilisation est fixée par la formule empirique :

$$C = K \left(\frac{S}{G}\right)^{4},$$

en faisant

$$K = 0{,}13,$$

ce qui donne, pour

$$\frac{S}{G} = 35, \qquad C = 159 \text{ kilogrammes.}$$

Au tirage forcé, pour brûler 200 à 250 kilogrammes de charbon par mètre carré de grilles, il faut donner à la surface de chauffe une valeur de 45 à 50 fois la surface de grilles ; on ne gagne pas d'ailleurs à dépasser cette proportion, même si l'activité du tirage forcé continue à s'élever.

En somme, l'étendue de la surface de chauffe est impropre à définir ce qu'une chaudière peut vaporiser d'eau, aussi bien que l'étendue de la surface de grilles à définir ce qu'elle peut brûler de charbon. Comme d'ailleurs la quantité d'eau vaporisée par kilogramme de charbon est toujours à peu près connue, la surface de grilles est infiniment plus propre que la surface de chauffe, à exprimer la puissance des chaudières, la nature du tirage étant d'ailleurs indiquée.

Les diverses conditions auxquelles doit satisfaire la chaudière se contrarient souvent entre elles ; c'est ainsi que pour avoir une grande surface de chauffe, il faut augmenter le nombre des tubes et diminuer leur diamètre, tandis qu'au point de vue du service, il est préférable de les faire assez gros, pour éviter les obstructions ou faciliter le ramonage.

On a généralement donné 7 centimètres de diamètre extérieur aux tubes des chaudières tubulaires ; il y a bénéfice, pour le rendement, à descendre à 5 centimètres ; même avec 5 centimètres, la formation des nids de pie est peu à craindre, si les chaudières sont bien construites et les joints de tubes bien étanches.

Sur les légendes des plans, on donne toujours à la fois la surface de grilles et la surface de chauffe. Pour la mesure de la surface de grilles, il ne se rencontre pas de difficulté. Pour le calcul de la surface de chauffe, on exclut certaines parois : la surface des cendriers, dans les chaudières cylindriques, et la demi-surface, tournée vers le dehors, des écrans de tubes jointifs disposés pour protéger l'enveloppe, dans certaines chaudières tubuleuses. Il est indispensable que les règles à cet égard soient les mêmes dans toutes les salles de dessin, pour que les résultats des calculs soient comparables entr'eux.

73. — *Pertes par rayonnement. Feutrage.* — Les chaudières reçoivent toujours une enveloppe isolante, destinée à diminuer les pertes de chaleur par rayonnement et par conductibilité. Les pertes ont le triple inconvénient de diminuer le rendement en vapeur par kilogramme de charbon consommé, d'être une gène pour le personnel des chauffeurs, enfin de créer un danger d'incendie pour les matières combustibles voisines de la cheminée.

Dans les chaudières tubulaires, les conduits de flamme sont entièrement entourés de lames d'eau ; la surface extérieure de la chaudière proprement dite ne peut donc pas dépasser une température assez basse, qui approche de 200 degrés, aux pressions actuelles, et qui serait de 211 degrés seulement pour une pression de 20 kilogrammes. Ces conditions favorables donnent toute sécurité contre l'incendie et permettent assez facilement d'obtenir l'isolement nécessaire au point de vue du rendement.

Pendant une longue période, c'est-à-dire aussi longtemps que les pressions sont restées inférieures à 6 kilogrammes, et les températures inférieures à 160 degrés, on a recouvert les chaudières d'une couche de feutre animal enveloppée de toile, présentant une épaisseur totale de 3 centimètres, et un poids de 4 kilogrammes par mètre carré. L'isolement dû à ce feutrage a été déterminé, au cours d'expériences comparatives très soignées faites à Toulon en 1889, par M. Brocard ingénieur de la marine. Un réservoir de $2^{m^2},184$ de surface extérieure, rempli de vapeur à 12 kilogrammes de pression et feutré selon les règles, a donné une condensation de 54 kilogrammes de vapeur en 10 heures ; la température ambiante extérieure étant de 27 degrés.

La condensation de 1 kilogramme de vapeur, à 12 kilogrammes de pression, abandonnant 176,6 calories on déduit des chiffres précédents que la perte par rayonnement était de 900 calories par heure et par mètre carré de surface. Une chaudière à trois foyers comme celle du *Jean-Bart* présente 61$^{m^2}$ de surface feutrée, savoir : 14$^{m^2}$,5 sur l'enveloppe, 43 mètres carrés sur le fond, 3$^{m^2}$,5 sur la façade ; la perte totale de chaleur est donc de 54.900 calories à l'heure, équivalant à une consommation de charbon de 6 kilogrammes, soit à 1 % environ de la chaleur totale produite sur les foyers dans une chauffe un peu active. Ce résultat indique un isolement convenable, qu'il n'y a guère à chercher à dépasser; on réduirait cependant la perte en doublant l'épaisseur du feutre, ainsi que nous le verrons tout à l'heure.

Le feutre a l'inconvénient de n'être pas incombustible ; il paraît présenter des traces d'altération aux températures de 200 degrés auxquelles on arrive, et il brûle avec flamme vers 650 degrés. Il en est résulté des accidents gênants et même de véritables incendies dans les enveloppes, qui ont pris feu, tantôt au contact des outils de chauffe ou des escarbilles et du mâchefer, tantôt au contact de la flamme des lampes et des bougies. De là, nécessité reconnue d'employer des revêtements de nature minérale, amiante et coton siliceux. Les expériences de M. Brocard ont eu pour but principal de rechercher la valeur comparative de ces divers isolants.

Le réservoir, de 2$^{m^2}$,184 de surface extérieure, dont il a été question, se composait de deux parties, savoir les fonds, de 0$^{m^2}$,40 qui, dans l'expérience déjà citée devaient condenser

$$54 \times \frac{0{,}40}{2{,}284} = 10 \text{ kilogrammes}$$

de vapeur, et la partie cylindrique de 1$^{m^2}$,784, qui devait condenser 44 kilogrammes. Le feutrage des fonds restant le même, on a remplacé celui de l'enveloppe cylindrique par six feutrages de nature différente, et on a mesuré, dans chaque cas, la quantité d'eau totale condensée pendant 10 heures.

En supposant que, dans toutes les expériences, la quantité d'eau condensée par les fonds ait été de 10 kilogrammes, et en retranchant ces 10 kilogrammes de la condensation totale, on a, pour représenter la valeur comparative de tous les isolants essayés, le tableau suivant, sur lequel est porté le poids du mètre carré de chacun de ces isolants :

MATIÈRES ISOLANTES EMPLOYÉES	POIDS du revêtement (mèt. carré)	EAU CONDENSÉE	
		En 10 heures	Par heure et par mètre carré
3 centimètres de feutre et toile	4k,3	44k,0	2k,47
5 centimètres d'amiante, y compris une lame centrale ds 5 millimètres de coton siliceux. . .	16 ,0	40 ,1	2 ,25
5 centimètres d'amiante pure.	15 ,7	39 ,2	2 ,20
5 centimètres de coton siliceux	17 ,8	33 ,9	1 ,90
6 centimètres d'amiante, y compris une lame centrale de 5 millimètres de coton siliceux. . .	17 ,7	33 ,0	1 ,85
6 centimètres d'amiante pure.	17 ,2	32 ,8	1 ,84
6 centimètres de feutre et toile.	8 ,3	22 ,0	1 ,23

Ce tableau, dans lequel on pourrait relever quelques anomalies, fait ressortir clairement la grande supériorité à poids égal, du feutre sur les isolants minéraux. En tenant compte des prix, la différence est plus importante encore, car les deux enveloppes de feutre essayées coûtaient respectivement 5 fr.,10 et 9 fr.,40 le mètre carré, tandis que, pour les cinq autres isolants, les prix, peu différents les uns des autres, étaient compris entre 16 et 18 francs le mètre carré.

M. Charles Norton a fait, en Amérique, une application très ingénieuse de l'électricité pour mesurer les pouvoirs isolants. Un réservoir, autour duquel est placée la matière isolante, est rempli d'huile ; un rhéostat plonge dans le liquide. On fait passer le courant de manière à maintenir une température constante dans le réservoir. La puissance en watts absorbée par le rhéostat est équivalente aux pertes par rayonnement.

Sur les chaudières cylindriques, le feutre est toujours employé comme isolant pour l'enveloppe et le fond. Sur l'enveloppe, il est bon de l'arrêter dans le bas, à quelque distance de la façade, pour éviter le contact des escarbilles et du mâchefer amassés sur le parquet de chauffe; on le recouvre toujours, du reste, dans toute la partie inférieure, d'une tôle de $1^{mm},5$, pour éviter le contact des outils de chauffe, qui se remisent souvent entre les chaudières après avoir servi. On feutre encore fréquemment la portion des façades susceptibles de l'être, en ayant soin d'arrêter le feutre à $0^{m},40$ au moins des conduits de fumée, sous un petit feuillard en Z, de ne pas le faire descendre à plus de $0^{m},25$ de distance des parquets, enfin, de ne pas l'amener à plus de $0^{m},15$ du bord des trous d'homme dans lesquels on peut introduire des bougies.

Partout où le feutre est supprimé, on le remplace par un isolant minéral, de préférence, le coton siliceux recouvert d'une toile d'amiante. Pour les façades, il semblerait plus simple, au point où l'on en est, d'employer exclusivement les isolants minéraux. L'emploi d'une toile d'amiante sur le feutre de l'enveloppe serait aussi à recommander, si les questions de prix n'intervenaient pas.

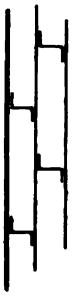


Fig. 51

74. — *Isolement des conduits de fumée.* — Sur les conduits de fumée, qu'il est nécessaire d'isoler pour diminuer le rayonnement des façades de chaudières sur les chauffeurs, on dispose, en général, deux écrans successifs, à des distances de 4 centimètres; le premier est simplement en tôle mince; le second en laiton poli, à faible pouvoir émissif; on a soin de chevaucher les attaches de ces écrans entre eux et sur la boite à fumée ou ses portes, pour diminuer l'échauffement de l'écran extérieur par conductibilité.

Les écrans deviennent insuffisants dans la marche au tirage forcé en chambre close, puisqu'ils n'empêchent pas l'échauffement de l'air qui s'amasse dans les hauts de la chambre de chauffe sans trouver d'issue; l'emploi d'un léger feutrage en coton siliceux est alors avantageux. Sur le *Fulminant*, qui n'a pas de chambre close, le coton siliceux a rendu habitable une plate-forme placée directement sur les chaudières pour l'installation de machines soufflantes. Les revêtements de bois, autrefois employés sur les portes de boîtes à tubes et même les conduits de fumée, sont abandonnés, à cause des dangers d'incendie.

Il s'est fait autrefois un emploi assez étendu des isolants dits plastiques; c'était en général de la boue de rivière, mêlée à un ou deux millièmes de son poids de poil de vache, retenue en place par une toile métallique; les vases de mer ne peuvent convenir, à cause des chlorures qu'elles renferment. Les enduits plastiques n'ont qu'un faible pouvoir isolant; ils pourraient cependant rendre encore quelques services sous la culotte de cheminée, qui rayonne d'une manière si gênante dans la chambre de chauffe.

L'isolement de la cheminée elle-même est toujours obtenu par des lames d'air. Une première enveloppe, fixée à la cheminée par des tôles et cornières, fait partie de l'appareil évaporatoire; en la faisant monter jusqu'au sommet de la cheminée, on améliore le tirage, parce que le refroidissement à l'air libre est diminué, et on peut utiliser en même temps la lame d'air comme cheminée d'appel, pour l'aération de la chambre de chauffe et même des logements. Pour protéger les entreponts contre le rayonnement de la cheminée, il est bon d'entourer celle-ci

d'une seconde enveloppe faisant partie de la coque. La deuxième enveloppe, utile dans tous les cas, devient à peu près indispensable pour beaucoup de chaudières tubuleuses actuellement en essai, dont la cheminée est exposée à rougir.

Les chaudières tubuleuses, au point de vue de l'isolement, sont assimilables aux conduits de fumée des chaudières tubulaires; leur enveloppe en tôle est même soumise à des échauffements plus violents que celle de ces conduits, puisque, dans quelques-unes de ses parties, elle entoure les foyers eux-mêmes. Les isolants employés consistent principalement, pour la partie basse, dans un revêtement général de maçonnerie, et, pour la partie haute, dans une couche d'escarbilles comprise entre deux tôles minces. Une maçonnerie de briques, réduite à l'épaisseur de 5 centimètres, a l'inconvénient de peser 80 kilogrammes le mètre carré, non compris ses attaches; une couche de fraisil de même épaisseur pèse encore 35 kilogrammes au moins, non compris les tôles. Certaines chaudières tubulaires perdent par leurs enveloppes isolantes, une fraction importante de l'économie de poids, qu'elles permettraient sans cela de réaliser par rapport aux chaudières cylindriques.

Les feutrages en coton siliceux et en amiante trouveraient d'utiles applications sur diverses parties des chaudières tubuleuses et spécialement sur leurs façades. On a commencé à les employer à bord des torpilleurs.

CHAPITRE VII

DE L'USURE ET DE LA CORROSION

75. — *Causes d'usure chimiques produisant la détérioration intérieure des chaudières.* — La préservation des chaudières contre les agents chimiques de destruction, qui agissent peu à peu sur elles dans tout le cours de leur fonctionnement, repose sur des règles générales, communes à tous les genres de chaudières, cylindriques ou tubuleuses; elle trouve donc sa place ici, tandis qu'il faut réserver, pour l'étude séparée des divers modèles, la résistance aux causes mécaniques de fatigue des matériaux.

Une cause d'usure générale, commune à toutes les constructions en fer non entretenues de peinture, comme c'est le cas pour l'intérieur des chaudières, consiste dans l'oxydation au contact de l'air ou de l'eau. Cette action est très connue, il suffit de rappeler ici qu'elle exige la présence simultanée de l'air et de l'eau; ni l'air sec, ni l'eau pure et privée d'air, n'ont d'action chimique sur le fer. L'air dissous dans l'eau paraît agir d'une manière particulièrement énergique, dans les circonstances où il se dégage en bulles sur une tôle; il semble qu'au moment où il reprend ainsi sa forme gazeuse, l'oxygène ait quelque chose des propriétés des corps à l'état naissant.

L'eau de mer, même privée d'air, a de plus, à chaud, une action corrosive particulière, due à la présence du chlorure de magnésium. Le chlorure de magnésium se décompose par la chaleur, en présence de l'eau, et donne de la magnésie et de l'acide chlorhydrique, la réaction a lieu dans deux circonstances différentes.

En premier lieu, le dégagement d'acide chlorhydrique se produit dans l'eau de mer chauffée à la température de 100°, dès que la concentration est suffisante; on l'observe nettement, quand le volume de l'eau est réduit au cinquième; par là, s'explique la corrosion rapide, produite par les fuites, dans les joints de coutures et les trous de rivets.

En second lieu, le dégagement d'acide chlorhydrique se produit dans les dissolutions les plus étendues, lorsque la température est suffisamment élevée ; on admet généralement qu'il commence dès qu'on dépasse 120° et par conséquent 2 kilogrammes de pression ; il convient donc, pour les chaudières à haute pression chauffées entre 120 et 200°, de proscrire absolument la pratique, encore si répandue parmi les mécaniciens, de réparer les fuites avec de l'eau de mer.

La destruction rapide des tubes par piqûres locales, sur les chaudières Belleville, a été expliquée par l'emploi de l'eau de mer. Pour y obvier, sans renoncer à un moyen de réparation aussi simple que le recours à l'eau de mer, M. Belleville a préconisé comme réactif la chaux vive, qui a donné, en effet, de bons résultats, et dont l'emploi s'est étendu aux autres chaudières, surtout aux chaudières à tubes d'acier. On a conservé la chaux, tout en supprimant l'eau de mer.

Les autres chlorures alcalins dissous dans l'eau de mer ne paraissent pas pouvoir dégager d'acide chlorhydrique, en dehors de la présence de l'air, comme le fait le chlorure de magnésium, mais ils peuvent coopérer à l'usure des tôles en cas de fuites dans les joints. Ils peuvent aussi produire le même effet, quand ils sont chauffés en présence de la silice hydratée ou du sulfate de magnésie, comme nous le verrons tout à l'heure en étudiant l'action des dépôts solides.

76. — *Action des acides gras. Réactions chimiques dans les dépôts salins.* — La plus active des causes de destruction des chaudières a été, pendant quelques années, la présence des acides gras dans l'eau d'alimentation. L'usage des condenseurs à surface venait de se répandre, et, à la même époque, le suif et les huiles végétales étaient les seuls lubrifiants pour le graissage intérieur des machines.

Les acides gras, très mal fixés par la glycérine, se séparent d'elle dès le passage dans les cylindres à vapeur ; entraînés ensuite dans la circulation, ils attaquent les tôles des chaudières pour former des savons à base de fer. Les corrosions ont principalement pour siège les parois voisines de l'arrivée d'eau d'alimentation et celles voisines du niveau, où les acides, qui flottent avant leur saponification, se déposent sur l'enveloppe. Ces corrosions sont d'autant plus dangereuses que l'attaque, une fois commencée sur un point, s'y continue de préférence en produisant de profondes vermiculures. On a eu recours, comme moyen de préservation, à l'injection d'une solution de carbonate de soude dans la chaudière, procédé Hétet et Risbec ; mais le carbonate ne neutralise les acides gras qu'en décomposant les savons de fer, après que la corrosion est déjà produite ; de plus l'acide carbonique dégagé a lui-même un effet

pernicieux. Le carbonate de soude est aujourd'hui abandonné, et le lait de chaux est la seule solution alcaline restée en usage.

Les dépôts, qui se forment au fond des chaudières, présentent souvent des traces bien apparentes de sels de cuivre reconnaissables à leur couleur verte; on y a même signalé l'existence de paillettes de bronze paraissant venir des corps de pompe. Quelques auteurs ont attaché une grande importance à la présence du cuivre, en supposant qu'elle donnait naissance à des courants galvaniques; mais on sait que le cuivre n'a pas d'action bien perceptible quand il se trouve en proportion extrêmement faible en présence du fer. En somme, l'existence de courants galvaniques dans les chaudières ne s'est jamais manifestée nettement, même à l'époque des tubes en laiton; le fer est, il est vrai, particulièrement peu sensible au voisinage du laiton, à cause de la présence du zinc dans cet alliage.

La présence des sels neutres en dissolution n'est pas sans influence sur l'usure des tôles. Les sels de manganèse, par exemple, semblent favoriser l'attaque du fer, ce qui expliquerait l'usure plus rapide de certaines qualités de tôles d'acier. Les sels de zinc auraient plutôt l'action inverse. La présence des sels de mercure est certainement un préservatif pour le fer; mais on ne possède à cet égard que des résultats d'expériences de laboratoire.

Nous n'avons considéré, jusqu'ici, que l'action des matières en dissolution dans l'eau. Les dépôts qui se forment sur la surface des parois influent de deux manières distinctes, chimiquement par corrosion, physiquement en s'opposant à la transmission de la chaleur de manière à produire des coups de feu. L'action chimique se manifeste indifféremment sur les parois des conduits de flamme et sur celles des enveloppes, vraisemblablement avec plus d'énergie, sur les premières. L'action physique est produite, à la fois, par les dépôts de nature minérale et par ceux de nature organique; mais elle est limitée aux parois des courants de flamme.

L'action chimique des dépôts salins a été récemment mise en évidence, à Brest, par M. Haas, ingénieur de la marine, à l'occasion de la visite d'une chaudière Oriolle, dont les tubes étaient fortement piqués et percés sous la couche de sels qui les recouvrait; elle a été expliquée par une réaction entre le chlorure de sodium et la silice hydratée, donnant du silicate de soude et de l'acide chlorhydrique, et par une seconde réaction entre le chlorure et le silicate de magnésie, donnant du silicate de soude et du chlorure de magnésium décomposable à son tour par la chaleur :

$$Na\,Cl + Si\,O^3.\ HO = Na\,O.\ Si\,O^3 + H\,Cl,$$
$$Na\,Cl + Ma\,O\ Si\,O^3 = Na\,O\ \ Si\,O^3 + Ma\,Cl.$$

L'effet corrosif des dépôts salins ne se produit pas aux températures de 100° à 120°, auxquelles fonctionnaient autrefois les chaudières alimentées à l'eau de mer, car ces chaudières rentraient souvent de campagne, avec des lames d'eau maçonnées par les dépôts, et les tôles intactes. Les mécaniciens avaient même soin de produire un léger dépôt, sur toutes les surfaces des tôles, foyers, boites à feu, etc., pour combattre les ébullitions tumultueuses et pour assurer une meilleure conservation de la chaudière.

L'action physique des dépôts s'est manifestée de tout temps, par la production des moines dans les tôles des foyers et par d'autres avaries du même genre; elle est particulièrement à craindre pour les plaques de tête des tubes, déjà mal rafraîchies par l'eau, à cause de l'abondance des bulles de vapeur sur leur paroi intérieure.

Les huiles minérales, en se déposant sur une tôle, y forment un vernis brun qui est particulièrement mauvais conducteur, comme nous l'avons vu au numéro 49, et qui, même sous une très faible épaisseur, peut amener un coup de feu. Ces dépôts dangereux se forment, quand on vide une chaudière sans avoir fait au préalable une abondante extraction de surface; toutes les parois, verticales ou horizontales, s'enduisent d'huile au moment où elles émergent. On explique en partie, par des dépôts de cette nature, les écrasements de foyers, qui se produisent quelquefois, par la surface latérale la plus fortement chauffée par la flamme.

77. — *Principales précautions contre la corrosion.* — Les précautions à prendre pour la bonne conservation des tôles de chaudières ont été en partie indiquées au numéro précédent. On peut les résumer de la manière suivante :

Dans la construction, les enveloppes doivent recevoir un complément d'épaisseur de deux millimètres à quatre millimètres, en vue de l'usure; cette légère marge suffit.

Il faut éviter de doubler les tôles dans les parties exposées au feu, et y proscrire absolument l'emploi de tout joint au mastic.

Il faut veiller à la parfaite étanchéité de toutes les coutures, et apporter un soin spécial, à l'emmanchement des tubes. Pour les tubes en fer ou en acier, on réclame la substitution de tubes sans soudure aux tubes soudés actuels, qui se piquent presque toujours à la soudure, sans parler des dangers de déchirement dans les chaudières tubuleuses.

Sur les chaudières au repos, il faut éviter avec soin la présence de l'air humide à l'intérieur. Le moyen le plus sûr est de chauffer la chaudière avec des réchauds remplis de charbon de bois, que l'on introduit

par les trous d'homme, et de fermer ensuite hermétiquement toutes les ouvertures. On peut aussi remplir entièrement la chaudière d'eau distillée et privée d'air, additionnée d'un peu de chaux ; ce dernier moyen est fréquemment employé maintenant, surtout pour les chaudières tubuleuses.

Pendant le fonctionnement, les précautions sont nombreuses, et portent en partie sur la conduite des machines.

On proscrit complètement l'emploi du suif et des huiles végétales pour le graissage intérieur des cylindres, en s'en tenant exclusivement aux huiles minérales, dont on limite la dépense au strict minimum. Le modèle des tiroirs de machine et le système de garniture des pistons a été spécialement étudié, dans ces dernières années, en vue de réduire presqu'à rien le graissage intérieur. Les presse-étoupes des tiges de piston et de tiroirs sont eux-mêmes graissés à l'huile minérale.

Il faut veiller à l'étanchéité des joints des tubes de condenseurs, et réparer les pertes avec de l'eau distillée, à l'exclusion de l'eau de mer. Il est sage de condamner les prises d'eau de mer pour réparation, quand elles existent sur les condenseurs.

Il faudrait empêcher l'eau d'alimentation de se charger d'air dissous, dans le trajet du condenseur aux chaudières. D'un autre côté, il est nécessaire de filtrer et de dégraisser l'eau d'alimentation, en veillant au bon fonctionnement des filtres et des dégraisseurs de vapeur ou d'eau.

Comme il arrive toujours un peu d'huile minérale aux chaudières, malgré les précautions prises, il faut faire, assez fréquemment, une petite extraction de surface pendant la marche.

Quand les dépôts graisseux se sont produits, il est nécessaire d'effectuer un lessivage à la soude pour les dissoudre. La solution de soude caustique employée aux Messageries maritimes pour cet usage, est titrée à 5 % environ ; on chauffe le liquide jusqu'à l'ébullition, que l'on maintient pendant une heure ; puis on fait la vidange complète de la chaudière.

Comme moyens particuliers de préservation, rappelons l'emploi des lames de zinc qui est devenu général, ainsi que celui de l'eau de chaux dans l'alimentation ; mais il faut avoir grand soin de ne pas abuser de la chaux, car il est arrivé, sur certains bâtiments, que la vapeur entraînant de la chaux dans les cylindres, a produit des broutements, et des usures anormales des surfaces frottantes.

Enfin, quand on marche avec une partie seulement des chaudières, il importe de veiller à l'étanchéité des soupapes par lesquelles la vapeur pourrait aller mouiller les chaudières au repos.

En matière de chaudières et de machines, il faut toujours se rappeler que les moindres précautions ont leur importance, et que rien n'est à négliger.

DEUXIÈME PARTIE

DESCRIPTION ET CONSTRUCTION DES CHAUDIÈRES TUBULAIRES

CHAPITRE VII

CHAUDIÈRES CYLINDRIQUES

§ 1. — Dispositions générales.

78. — *Chaudières type marin.* — *Modèle à simple façade.* — Nous allons considérer successivement les divers modèles déjà énumérés au n° 13, en donnant, comme figures, quelques exemples nouveaux.

La chaudière dite « type marin » est une chaudière cylindrique, tubulaire, à retour de flamme. On l'appelle quelquefois *chaudière écossaise*, à cause de l'application qui en a été faite, dès 1862, par la maison Randolph Elder sur le *Velasquez* et le *Murillo*. Elle a pris la place de l'ancien modèle rectangulaire, de dispositions analogues, qui a porté pendant vingt ans le nom de *chaudière marine*. Les chaudières rectangulaires ne pouvaient dépasser deux kilogrammes un quart de pression effective; avec les chaudières cylindriques, on est parti de 4 kilogrammes pour arriver aujourd'hui à 14 kilogrammes.

Parmi les chaudières *cylindriques*, un assez grand nombre sont plus hautes que larges, étant composées en réalité de deux demi-cylindres raccordés par des parties planes; on les nomme habituellement *chaudières elliptiques*. Dans un autre modèle, longtemps adopté dans la marine américaine, les façades et les fonds, au lieu d'être de forme plane, sont eux-mêmes cylindriques, dans la partie supérieure qui forme coffre à vapeur. Actuellement ces deux dispositions sont abandonnées.

Le défaut d'espace oblige assez souvent à faire subir une troncature à la partie inférieure des chaudières, du côté de la face arrière, quand les chaudières sont placées en abord, avec chambre de chauffe longitudinale.

L'enveloppe extérieure comprend une partie cylindrique, ou enveloppe proprement dite, plus une façade et un fond plans; elle contient l'eau et la vapeur; la surface de l'eau est environ aux deux tiers de la hauteur, sans qu'il y ait à formuler à ce sujet de règle précise.

Drôme

Chaudière cylindrique type marin

Echelle de 25 millim. par mètre.

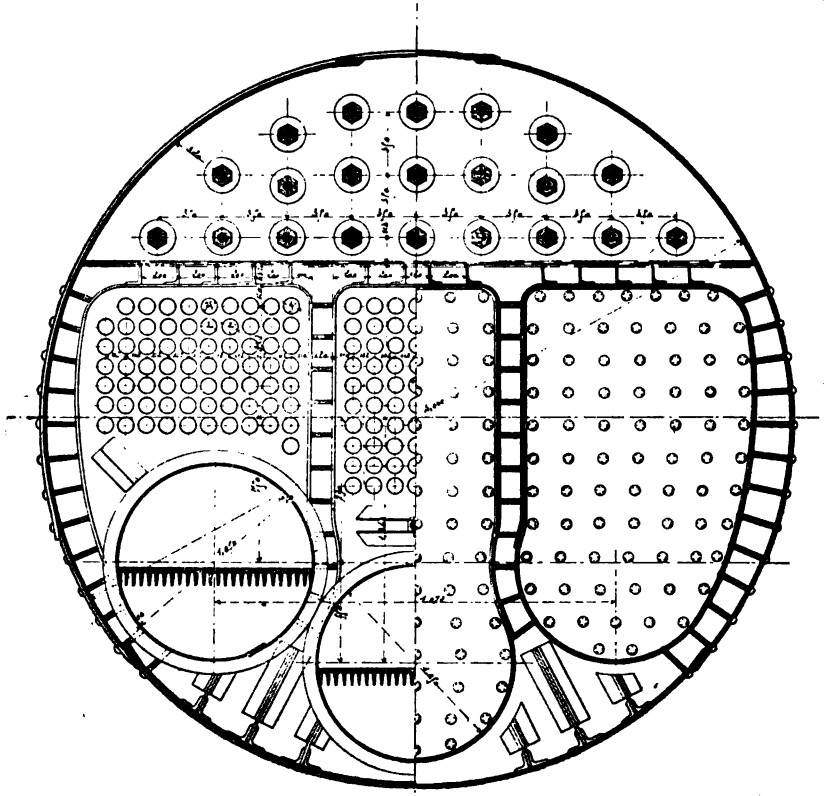


Fig. 52

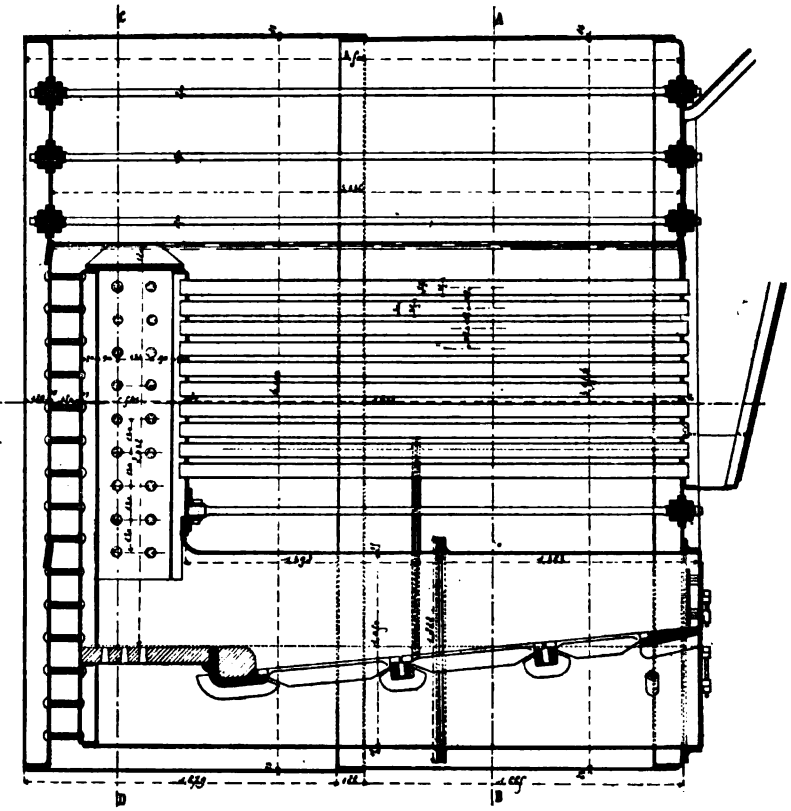


Fig. 52 *bis*

Dans la partie occupée par l'eau, et en restant partout à $0^m,20$ au-dessous du niveau normal, sont noyées les capacités destinées à renfermer la flamme et les gaz chauds, savoir :

1° Les foyers ouvrant sur la façade ;

2° Les boîtes à feu ;

3° Les faisceaux de tubes, en nombre égal à celui des foyers, faisant retour à la façade.

Au sortir des tubes, les gaz chauds se rendent à la cheminée par les conduits de fumée, qui sont extérieurs à la chaudière et d'une construction indépendante.

Les foyers sont au nombre de un, deux, trois ou quatre, sur la façade; ils se trouvent à des hauteurs différentes quand il y en a plus de deux. Leur section est nécessairement cylindrique. Leur diamètre varie de $0^m,80$ à $1^m,10$. En augmentant le nombre et diminuant le diamètre des foyers, on augmente la surface de grilles, ce qui permet de brûler plus de charbon; en augmentant au contraire le diamètre et diminuant le nombre, on obtient une meilleure combustion, et la chaudière a un rendement supérieur. Les charbons à longue flamme exigent des foyers de grand diamètre. D'une manière générale, on préférerait les grands diamètres, s'il ne fallait tenir compte des conditions de solidité; le danger d'aplatissement des foyers augmente rapidement avec le diamètre.

La boîte à feu, qui reçoit les gaz des foyers et les distribue dans les tubes, est le siège d'une combustion encore très active. Elle forme ainsi le prolongement indispensable du foyer; elle remplit d'autant mieux cet office, que le renversement de flamme, qui s'y opère, brasse les gaz et met les filets combustibles en contact avec les filets d'air comburants. On lui donne toujours une profondeur supérieure de $0^m,30$ au demi-diamètre du foyer, et on gagnerait peut-être à l'agrandir. La combustion n'est jamais complète; le panache de fumée, qui sort de la cheminée, surtout au moment où l'on charge de charbon frais, en est la preuve. On reste même assez loin des conditions du gazogène idéal, qui enverrait dans les tubes les produits d'une combustion parfaite, pour que des réinflammations de gaz à la base de la cheminée soient possibles.

Tantôt la chaudière présente une boîte à feu unique, où aboutissent tous les foyers et d'où partent tous les tubes, tantôt il y a des lames d'eau, partageant la boîte à feu en autant de compartiments qu'il y a de foyers (fig. 52 et 52 *bis*). Les lames d'eau fournissent un complément de surface de chauffe et, de plus, répartissent plus également la flamme, en attribuant sa part à chaque faisceau de tubes; sous ce dernier rapport, la lame centrale n'a pas la même utilité que les deux lames latérales, quand il y a quatre foyers.

Germanic, Paquebot de la Cie White Star

Chaudières cylindriques à simple et à double façade

Echelle de 16 millim. par mètre.

1er MODÈLE

Une seule boîte à feu pour deux foyers d'une façade

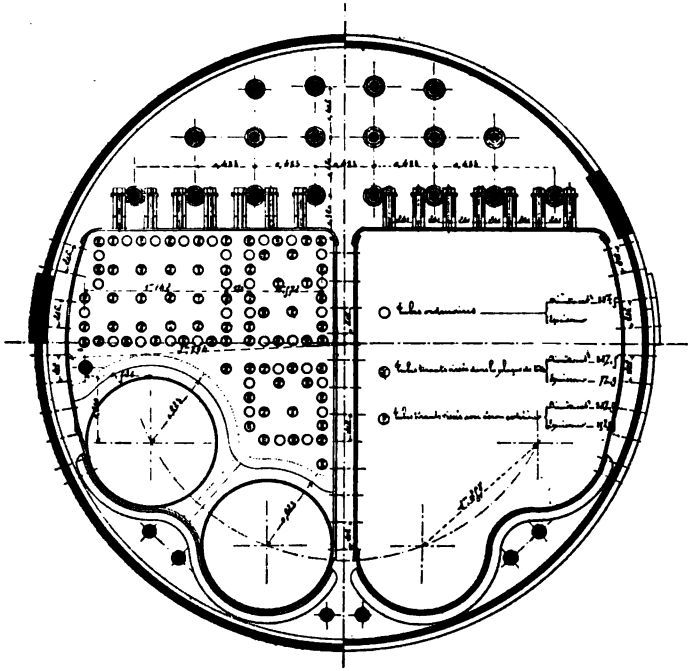


Fig. 53

Boîte à feu

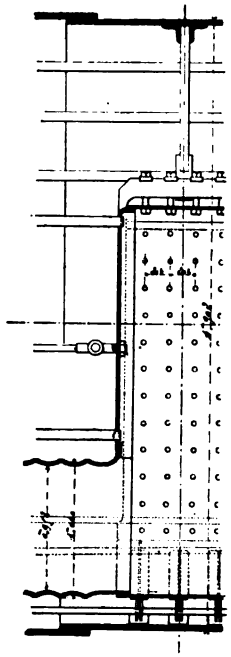


Fig. 53 *ter*

2e MODÈLE

Une boîte à feu pour deux foyers, un sur chaque façade

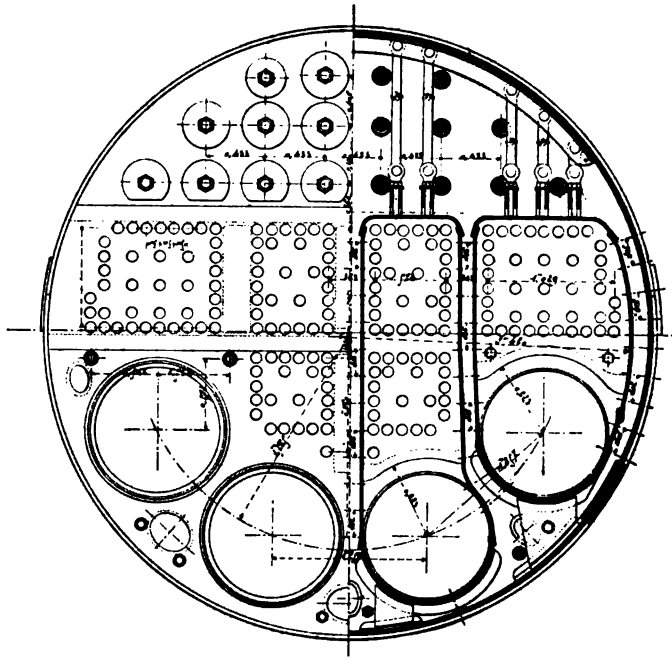


Fig. 53 *bis*

Sur les paquebots, on fait le plus souvent l'économie des lames d'eau. Sur les bâtiments de guerre, au contraire, la boîte à feu est presque toujours sectionnée. Cette différence se justifie par les exigences du tirage forcé sur les navires de guerre; on brûlerait souvent, au tirage forcé, les tubes sur lesquels les gaz se portent en excès, quand la boîte à feu est unique.

79. — *Modèle à double façade.* — La disposition des chaudières à double façade a été d'abord introduite sur les paquebots, et c'est pour les paquebots qu'elle réalise tous ses avantages, parce qu'on s'y contente d'une boîte à feu unique pour les deux façades avec une simple division longitudinale dans l'axe (fig. 53). La construction est ainsi très simplifiée, puisqu'on n'a même plus à établir la lame d'eau à deux parois entretoisées, qui forme le fond d'une chaudière simple. On fait le bénéfice accessoire du feutrage de deux fonds.

La boîte à feu unique reçoit, comme profondeur, le diamètre d'un foyer plus $0^m,30$; c'est, sur la profondeur totale de deux chaudières simples adossées, un bénéfice de $0^m,30$, plus l'épaisseur des deux lames d'eau, plus l'espace qu'on laisserait entre les chaudières, en tout 1 mètre environ. Le bénéfice réalisé sur le poids est également important.

Les chaudières à double façade dépassent souvent le poids de 50 tonneaux.

Essayées sur les bâtiments de guerre, marchant au tirage forcé, les chaudières à deux façades, avec chambre de feu unique, ont donné lieu à de nombreuses avaries de tubes, spécialement dans la flotte anglaise; on a donc pris le parti de diviser la chambre en deux parties, une pour chaque façade (fig. 54), en même temps qu'on compartimentait pour chaque foyer. La division par façade, en raison de la symétrie, ne semble indispensable que si les feux sont inégalement conduits sur les deux façades, ou le tirage forcé inégalement réparti. Quoi qu'il en soit, elle est pratiquée au même degré que la division par foyers. Les chaudières à double façade perdent ainsi, sur les bâtiments de guerre, une grande partie des avantages, qu'elles présentent sur les paquebots, au point de vue de l'encombrement, du poids, de la simplicité de construction.

Sur quelques paquebots, par exemple le *Lucania* et le *Campania*, on a une boîte à feu unique pour les deux foyers correspondants des deux façades, ce qui est rationnel.

80. — *Chaudières à tubes directs* (fig. 55). — Au lieu de mettre les tubes en retour, au-dessus des foyers, on peut les disposer en prolongement des foyers et à la même hauteur à peu près que les foyers, dont ils restent séparés d'ailleurs par la boîte à feu. Cette disposition conduit à des chaudières de diamètre beaucoup moindre, qui peuvent se loger sous les ponts

Columbia

Chaudière cylindrique à double façade

Echelle de 24 millim. par mètre

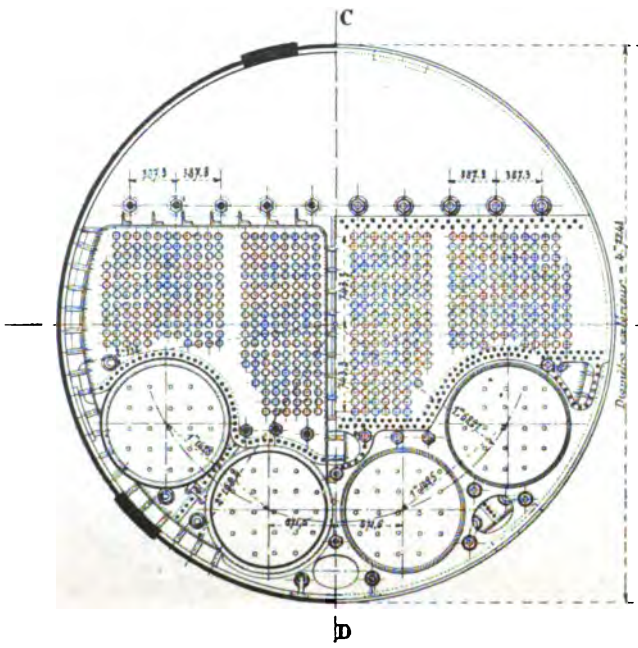


Fig. 54

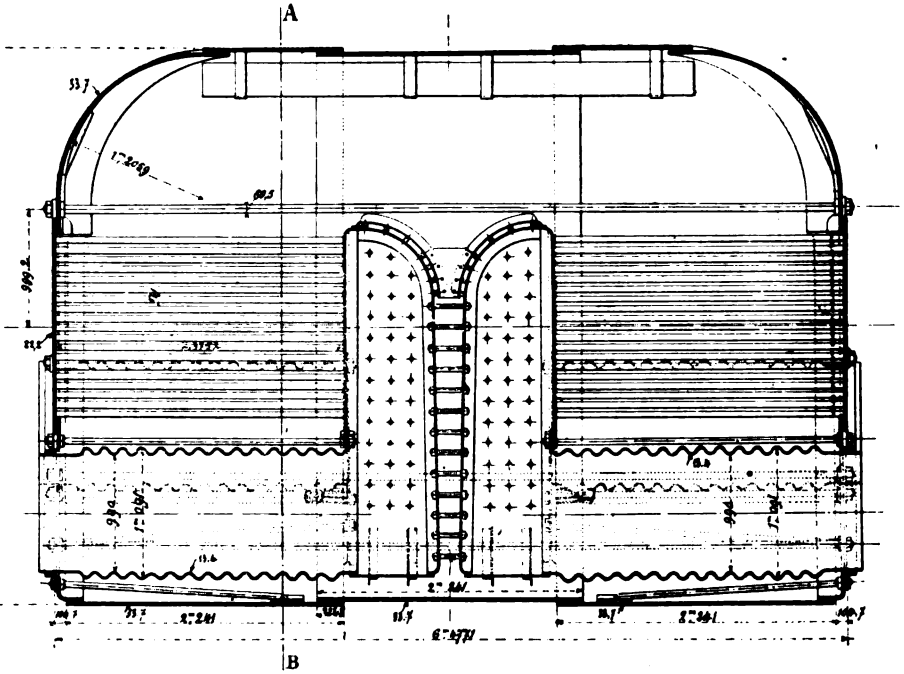


Fig. 54 *bis*

Linois

Chaudière type Amirauté (à tubes directs)

Echelle de 2 centim. par mètre

Coupe longitudinale suivant AB.

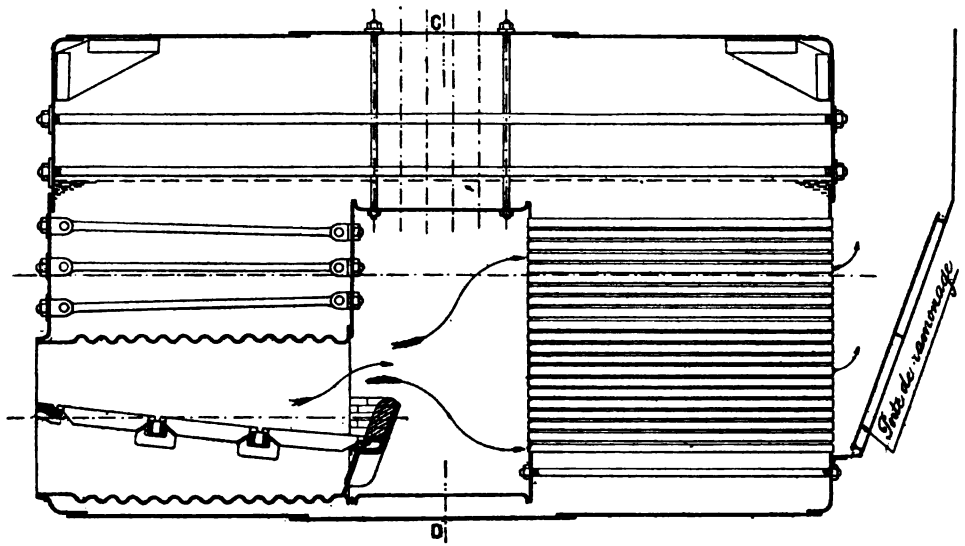


Fig. 55

Mi-vue et mi-coupe suivant AB

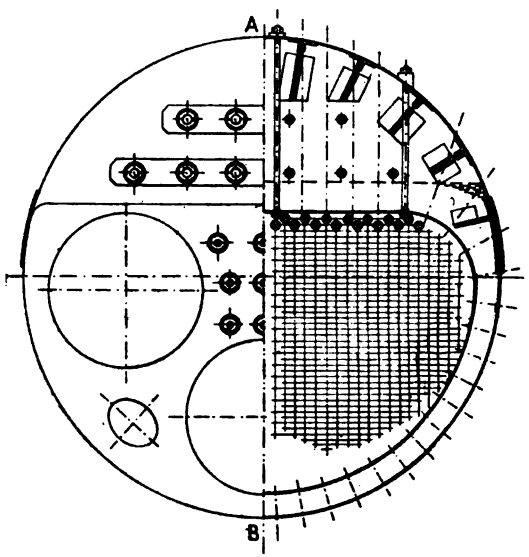


Fig. 55 *bis*

où la chaudière à retour de flamme ne trouverait pas place. En raison même de la différence des diamètres, la charge sur l'enveloppe est moindre; on peut donc, en employant des tôles de même épaisseur, aborder des pressions plus élevées. Enfin, sur les chaudières à tubes directs, on donne aux tubes telle longueur que l'on veut, tandis que les tubes en retour ont nécessairement la longueur du foyer.

Les inconvénients de la chaudière à tubes directs consistent en ce que les gaz chauds sont moins bien brassés, et les tubes plus inégalement chauffés. Les foyers, très voisins du niveau de l'eau, sont exposés aux coups de feu, dès que le niveau vient à baisser. Le danger des coups de feu est aussi plus grand pour le ciel de la boîte à feu, qui, s'il n'est pas plus près du niveau, est beaucoup plus près du foyer. De plus, en raison de la longueur de la chaudière, les dénivellations sont plus grandes, pour une même inclinaison du navire. Enfin les inégalités de dilatation des différents éléments de la chaudière et surtout des hauts et des fonds sont plus sensibles, en raison du plus grand rapport de la longueur au diamètre, et elles produisent des fatigues locales plus grandes; ce dernier effet s'accroît encore en raison de ce que la circulation de l'eau est moins active à l'intérieur des chaudières longues et basses. Pour ces motifs, et pour d'autres de moindre importance, on n'a plus recours aux chaudières à tubes directs, sauf en cas de nécessité absolue.

La boîte à feu des chaudières à tubes directs, a besoin d'être plus longue que celle des chaudières à retour de flamme ; elle doit être partagée par des lames d'eau, quand on fait du tirage forcé, pour les mêmes motifs, ayant encore plus de force, qu'avec les tubes en retour. On a fait des tentatives malheureuses en vue d'utiliser la boîte à feu pour la vaporisation, soit en y plaçant des lames d'eau faisant en même temps écran devant les tubes les plus exposés (1) soit en y disposant transversalement de gros tubes bouilleurs ; les figures 56 et 57 représentent, la première le dispositif primitivement adopté sur le *Fleurus*, la seconde la disposition actuelle des chaudières de la *Surprise*. On a aussi employé des écrans en maçonnerie pour diriger le jet des flammes ; ce dispositif existe encore sur plusieurs navires; il présente l'avantage de brasser les gaz avant l'arrivée de la flamme sur la plaque tubulaire.

Les chaudières à tubes directs sont toujours à simple façade; il y a pour cela un motif absolu, en dehors même de la question de longueur, qui ferait reculer devant l'emploi des doubles façades. Le ramonage des tubes en marche serait impossible sur les chaudières doubles.

1. Ceci, tout au moins sur des chaudières à foyer rectangulaire type locomotive imitées du modèle Tembrinck.

Chaudière du **Fleurus**

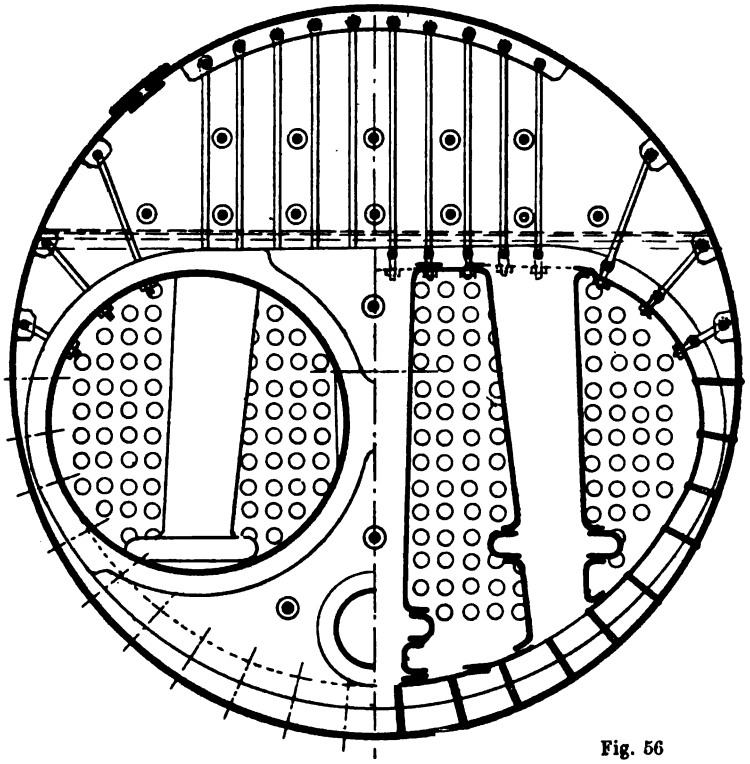


Fig. 56

Chaudière de la **Surprise**

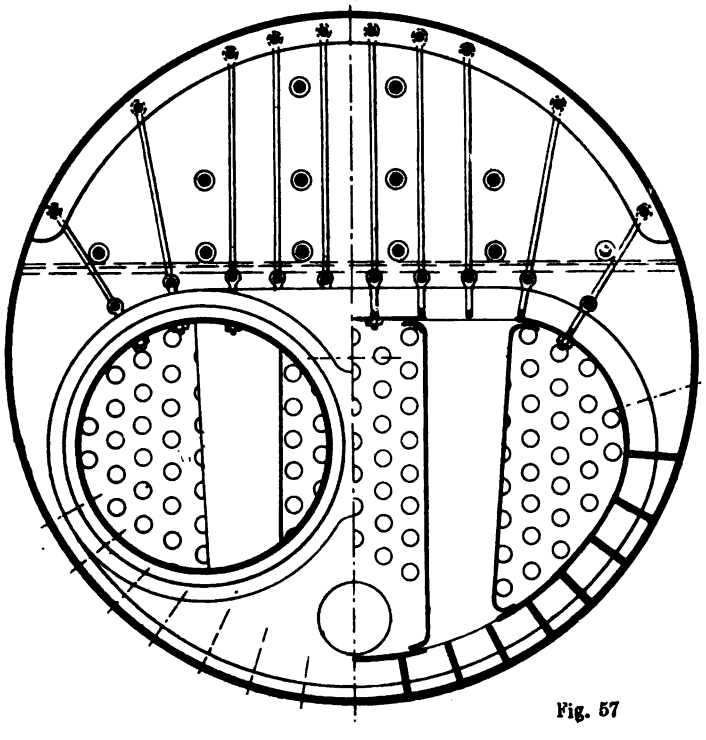


Fig. 57

Le modèle à tubes en prolongement porte assez souvent le nom de « chaudière de l'Amirauté » a cause du grand emploi qui en a été fait dans la marine royale anglaise ; en France, son usage a été longtemps limité aux canonnières.

Quand on parle de la chaudière marine, ou chaudière type marin, sans autre désignation, c'est de la chaudière à retour de flamme qu'il est question.

§ 2. — Construction.

81. — *Description des foyers.* — Chaque foyer est partagé par la grille en deux parties : le fourneau au-dessus, le cendrier au dessous. Les nécessités de construction obligent à placer le foyer horizontalement ; mais la grille est inclinée, généralement à la pente du dixième. Cette inclinaison, indispensable pour le service des feux, partage rationnellement le foyer, en donnant une section croissante au passage des gaz de la combustion, et décroissante à l'arrivée de l'air. On aurait peut-être intérêt à dépasser la pente du dixième ; mais on est arrêté, d'une part, par la nécessité de garder toujours sous la grille la hauteur nécessaire au passage du crochet, d'autre part, par la diminution que subirait la surface de grilles, si l'on s'éloignait trop de l'axe du foyer. Il semblerait avantageux d'incliner légèrement, sur l'arrière, la chaudière toute entière ; mais l'essai n'a pas été fait.

La longueur de la grille est arbitraire ; il y a généralement avantage à la faire moindre que celle du foyer ; il est bon, dans tous les cas, de ne pas dépasser $1^m,80$. Quand on doit marcher au tirage forcé, comme on n'a plus besoin d'une surface de grilles exactement déterminée, et que le service est plus difficile, on gagne à réduire la longueur à $1^m,50$, en forçant le tirage en proportion. La question de la longueur de grille a une grande importance, surtout si les chauffeurs ne sont pas très exercés. En effet, avec les grilles longues, le charbon est inégalement réparti sur la grille, ce dont nous avons vu les inconvénients.

Les portes de foyers sont percées de trous et munies de contre-portes intérieures destinées à les préserver contre le rayonnement. Il faut que les portes se manœuvrent très vite, pour rester ouvertes le moins longtemps possible. Le modèle à charnière horizontale et à contrepoids est à cet égard plus avantageux que le modèle ordinaire à deux vantaux et à charnières verticales ; nous reviendrons sur cette question dans le chapitre XIV.

Les cendriers ont des portes de divers modèles, entre lesquelles le choix est presque indifférent. Il faut signaler, à l'entrée du cendrier, la

barre d'appui du crochet ; quelquefois il y a deux supports pour permettre de donner à cette barre deux positions.

82. — *Foyers en viroles. Foyers en tôle ondulée. — Armaturages.* — Dans les chaudières modernes, les foyers sont toujours de forme cylindrique, afin de résister à la pression exercée sur eux par la vapeur. La charge à laquelle leurs parois peuvent résister est étudiée dans le *Cours de résistance des matériaux* ; l'étude en est délicate. La forme cylindrique, qui place les récipients en équilibre stable sous l'action des pressions intérieures, ne donne au contraire qu'un équilibre instable, quand la pression s'exerce extérieurement.

Toute déformation, qui rend les diamètres inégaux dans une même section, produit un moment de flexion auquel une tôle ne peut résister, et d'où résulte par suite une déformation croissante, allant jusqu'à l'écrasement. Or, pour les foyers en particulier, on a nécessairement une déformation initiale, résultant de la chauffe même, puisque leur partie supérieure est fortement chauffée par le courant de flamme du fourneau, tandis que leur partie inférieure est vivement refroidie par le courant d'air du cendrier.

La résistance des foyers à l'aplatissement réside, non dans l'épaisseur de leur tôle, mais bien dans leur armaturage.

Les foyers sont indéformables à leurs deux extrémités, rivées, l'une sur la façade, l'autre sur la cloison avant de la boite à feu. L'action des cloisons se fait sentir sur toute la longueur du foyer, parce que la déformation, dans le plan diamétral où le diamètre diminuerait par l'écrasement, ne peut se produire qu'en amenant, entre les cloisons, un rapprochement combattu par les pressions intérieures de la chaudière elle-même. Sur la valeur de cet élément de résistance, il y a toutefois lieu à controverse, parce que la fatigue des attaches du foyer avec les cloisons est pernicieuse. On a fait valoir en faveur des foyers ondulés, qu'ils pouvaient se dilater ou se contracter sans fatiguer les

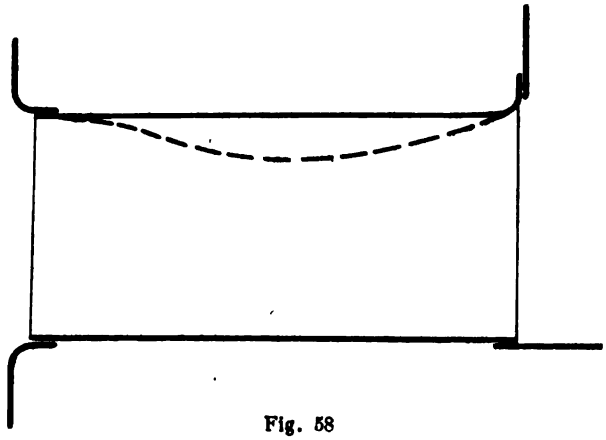


Fig. 58

attaches ; il est certain que l'on ne saurait se reposer entièrement sur les deux cloisons pour assurer l'indéformabilité des foyers.

La résistance bien assurée des foyers ne peut être obtenue que par une disposition donnant à leur paroi un moment convenable de résistance à la flexion.

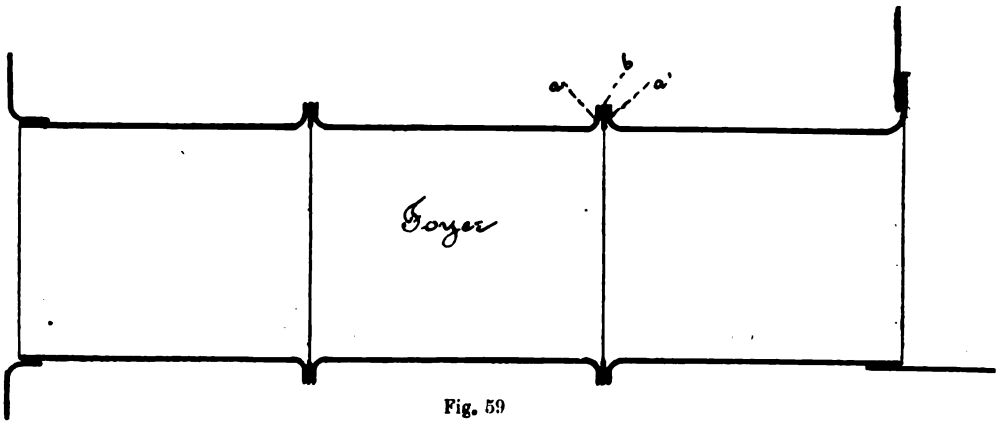


Fig. 59

On n'emploie pas les nervures extérieures en tôle et cornières, parce qu'en doublant l'épaisseur du métal, on provoquerait des coups de feu, partout où la tôle ne serait plus en contact direct avec l'eau. On com pose au contraire très bien les foyers d'anneaux assemblés entr'eux par

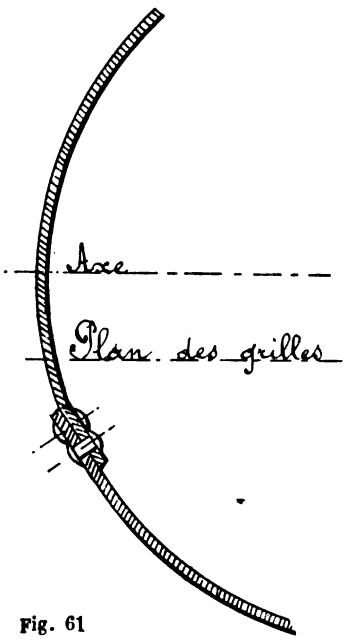


Fig. 61

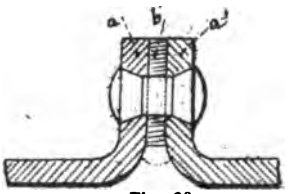
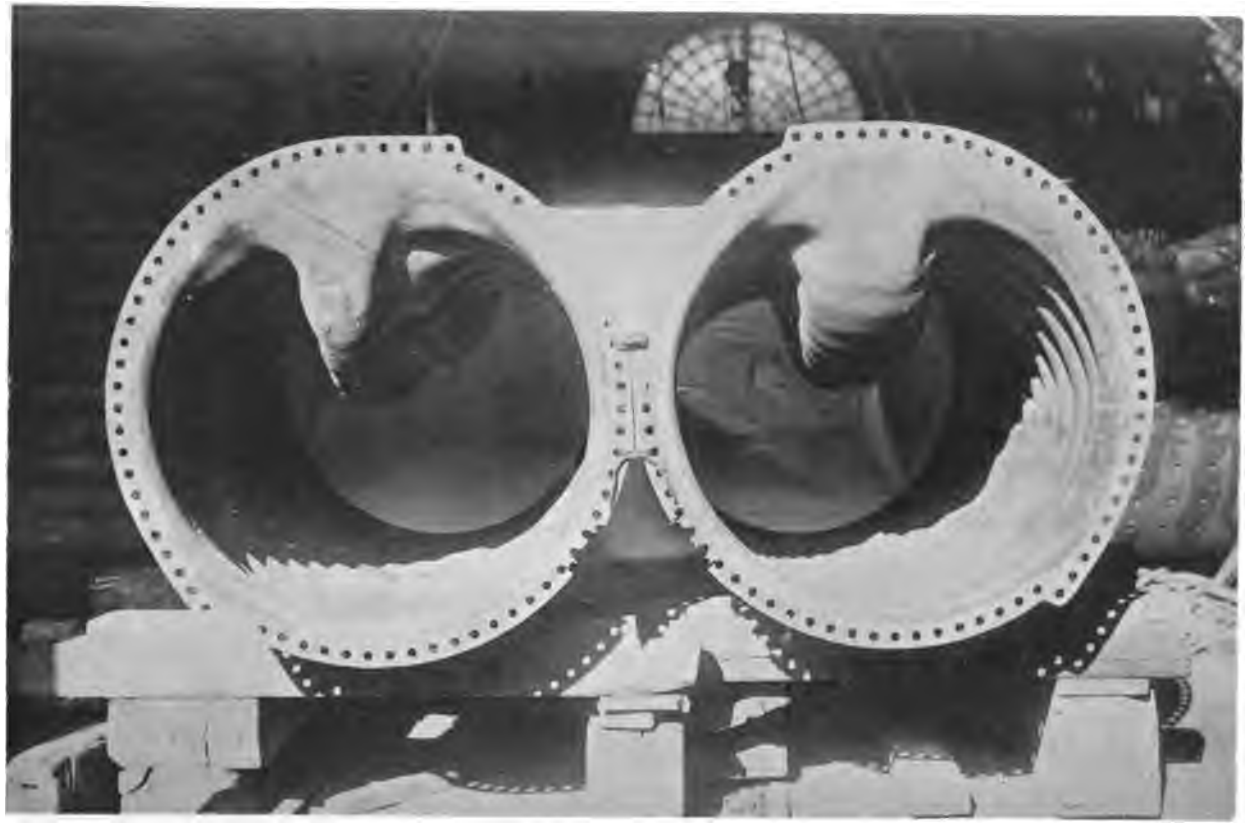


Fig. 60

des pinces rabattues formant nervures (fig. 59). Entre les deux pinces *a* et *a'*, on intercale toujours une rondelle *b*, moins pour l'accroissement de l'armaturage, que pour la protection ainsi donnée aux rivets, par le matage intérieur, contre le contact de la flamme (fig. 60).

C'est ainsi que sont construits beaucoup de foyers en tôle ; les bons ateliers possèdent un outillage spécial pour rabattre les pinces. Les anneaux composant ces foyers sont nécessairement

FIG. 63



sans couture longitudinale ; les tôles, coupées en biseau, sont soudées, L'opération du soudage altère les tôles, surtout les tôles d'acier, au raccordement de la partie chauffée au blanc soudant et de la partie restée froide ; aussi les foyers en tôle soudée sont-ils exposés en service à des déchirures, non sur la soudure même, mais dans son voisinage.

Comme détail, notons que sur les foyers rivés, on a soin de disposer la moitié supérieure en dedans et la moitié inférieure en dehors (fig. 61), pour ne pas former à l'intérieur une petite tablette, sur laquelle se déposerait du charbon.

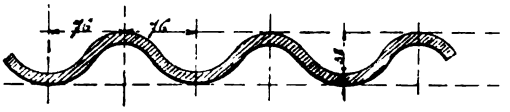


Fig. 62

Actuellement, on emploie des foyers en tôle ondulée auxquels leur forme seule assure une certaine résistance à la flexion. Les plus anciens et les plus usités sont les foyers Fox (fig. 62), à profil sinusoïdal, d'une flèche à peu près égale à la moitié de la hauteur qu'on donnerait à des collerettes. Leur fabrication est bonne ; la soudure, très bien faite, échappe à l'inconvénient signalé plus haut. Pendant longtemps les foyers Fox ont donné toute satisfaction ; mais, depuis que les pressions ont atteint 10, 12 et même 14 kilogrammes, avec des profils d'ondulations restés les mêmes, ils ne répondent plus aux exigences de la situation ; on a eu de nombreux affaissements.

La particularité des foyers Fox, en raison même de leur grande superficie de tôle, est de se prêter à des déformations énormes, dès que la position d'équilibre est dépassée ; le ciel du foyer peut s'aplatir, jusqu'à venir porter sur les grilles, sans qu'il en résulte, ni grande tension locale en aucun point de la tôle ainsi déformée, ni grande fatigue à l'attache avec les cloisons planes de la chaudière. Des accidents de ce genre se sont produits dans les essais du *Dupuy-de-Lôme* et du *Wattignies*. La figure 63 représente la photographie de l'ensemble des deux foyers du *Wattignies* ainsi déformés. Comme les chaudières des deux bâtiments dont il s'agit sont à tubes directs, et que le ciel des foyers est très voisin du niveau de l'eau, on pourrait attribuer les avaries au suréchauffement résultant d'un arrêt d'alimentation ; mais des affaissements tous pareils ont eu lieu sur des paquebots, avec les chaudières à flamme en retour ; le suréchauffement, dans ce cas, n'aurait pu être occasionné que par des dépôts de calcaire ou d'huile minérale sur le ciel des foyers. Ces grands affaissements de foyer ont été remarquablement inoffensifs, sans arrachement de couture, ni fuite de vapeur, ce qui prouve la bonne qualité des tôles.

Pour prévenir les affaissements, on n'a d'autre moyen que de veiller aux petites déformations qui les précèdent, et de rétablir les diamètres corrects avec un vérin, dès qu'une ovalisation se manifeste. Ces réparations sommaires témoignent d'une grande confiance dans les foyers Fox ; mais elles offrent peu de garanties pour les foyers, et peuvent fatiguer les pièces voisines.

Quoi qu'il en soit, comme on ne peut accepter de vivre sous la menace d'avaries comme celles du *Dupuy-de-Lôme* et du *Wattignies*, on a modifié le foyer Fox, de manière à diminuer l'étendue de la surface, cause de la grande déformabilité, et à conserver au foyer une raideur longitudinale. On a obtenu ainsi plusieurs modèles nouveaux, dont le plus répandu est le modèle *Purves*, représenté figure 64, qui parait donner de bons résultats.

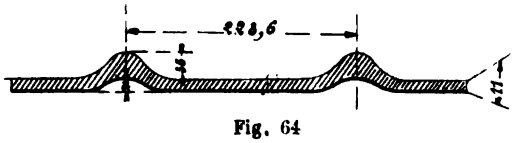


Fig. 64

Il est clair, d'ailleurs, qu'aucun foyer ne peut résister à l'action du feu, quand il est recouvert localement d'un dépôt isolant de sels ou d'huile minérale.

D'autres systèmes de foyers renforcés méritent d'être cités, bien que peu usités en France. On peut constituer des armatures extérieures avec des fermes circulaires, figures 65 et 65 *bis*, faites avec des anneaux ou couronnes en fer plat ou en cornières, tenues parallèles à 3 ou 4 centimètres de distance, au moyen d'entretoises ; le foyer est muni de boulons, rivés ou vissés dans son épaisseur, et passant entre les deux armatures auxquelles ils sont reliés par des écrous. Ces armatures sont du

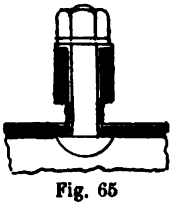


Fig. 65

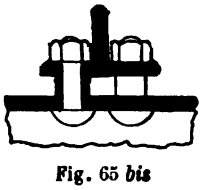


Fig. 65 *bis*

genre de celles dont nous trouverons l'emploi courant pour les ciels de boites à feu. On peut composer le foyer de viroles de diamètres différents raccordées entr'elles sur leurs bords (1). En définitive aucun de ces systèmes ne semble présenter les garanties du foyer ondulé, genre Fox ou Purves, lorsque les ondulations sont judicieusement disposées, car il importe avant tout de diminuer le nombre des coutures et des

1. Voir Seaton. *A manuel of marine engineering*, 1895, p. 425.

rivets directement exposés au feu; or, sous ce rapport, les foyers ondulés remplissent bien les conditions requises.

L'attache des foyers, sur les cloisons auxquelles ils sont fixés, est une des parties de la construction qui exige le plus de soin et d'habileté; les fatigues locales peuvent y être grandes, et les moindres fuites sont une cause de détérioration rapide.

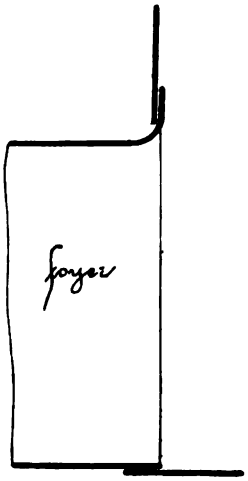


Fig. 66

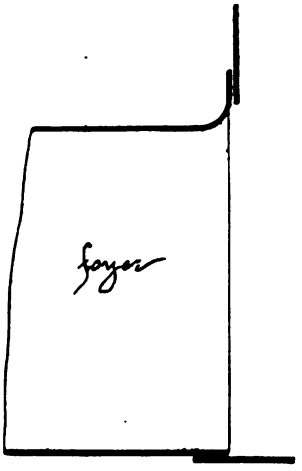


Fig. 66 *bis*

Le travail se fait en montant d'abord les foyers sur la boite à feu, puis en rapportant la façade sur le tout.

En général, la tôle du foyer, rabattue à la partie supérieure, est appliquée sur la face postérieure de la plaque de tête; l'introduction de la tôle rabattue dans la boite à feu est facile, à cause de la forme de la partie inférieure, figure 66. On attache une certaine importance à cette disposition, parce que la flamme du foyer ne rencontre pas le can d'une tôle, qu'elle serait exposée à brûler. Toutefois, comme le danger des coups de feu n'est pas le plus grand auquel soit exposé ce joint, soumis à des échauffements irréguliers suivis de contractions, on adopte quelquefois la disposition inverse, plus commode pour les réparations, de la figure 66 *bis*.

La forme du joint du côté de la boite à feu permet toujours de faire porter exactement les tôles les unes sur les autres dans le montage; mais, sur la façade, où l'on a deux cylindres glissant l'un dans l'autre, il faut laisser entre eux 5 millimètres de jeu sur le diamètre, et donner ensuite au foyer l'expansion nécessaire pour le faire porter sur tout le pourtour. La figure 67 montre que, dans le travail, on est exposé à n'avoir de portage que tout à fait à l'extrémité avant du foyer. Pour obtenir un bon joint, il faut donner à la collerette de la façade une forme conique

permettant au foyer, rendu conique lui-même par l'expansion, de porter partout, figure 67 *bis*.

On préfère assez généralement aujourd'hui, rabattre les pinces de la façade vers l'extérieur, figure 67 *ter*; ce qui rend l'emmanchement plus commode et le rivetage plus facile (surtout le rivetage hydraulique). Ce dispositif est moins satisfaisant que le précédent, au point de vue de la tenue de la couture, lorsque la chaudière est sous pression; on voit en

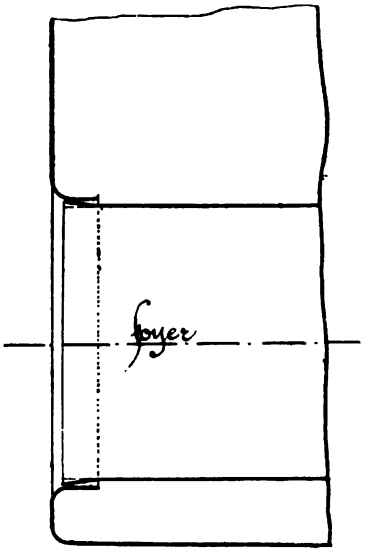


Fig. 67

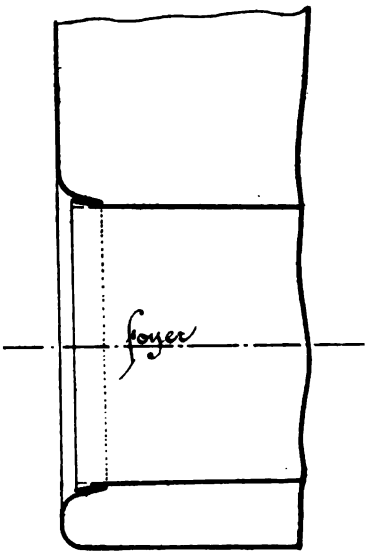


Fig. 67 *bis*

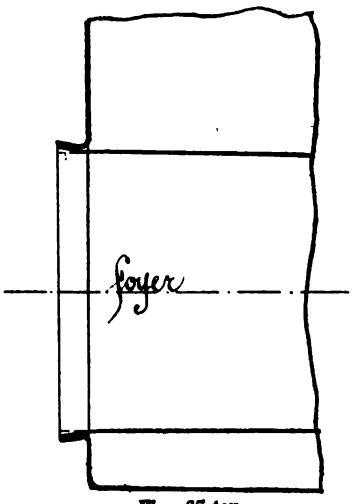


Fig. 67 *ter*

effet, figure 67 *ter*, que la pression intérieure tend à séparer les deux lèvres de l'assemblage, tandis que, figure 67 *bis*, elle appuie et soutient le matage intérieur.

Le travail d'expansion du foyer doit toujours se faire à froid, surtout si la tôle est en acier, parce que les chaudes locales altèrent l'acier.

Les foyers bien construits, en matériaux de bonne qualité, durent aussi longtemps que l'enveloppe des chaudières. Construits en fer, ils sont exposés dans le ciel à des avaries locales résultant du dédoublement des tôles; pour les réparer, on enlève la boursoufflure et on applique une pièce en ayant soin de n'interposer aucun mastic. Pour les foyers

ondulés, on taille les pièces dans un morceau de foyer ondulé. Les foyers actuels, faits en tôle d'acier, sont à peu près à l'abri de ce genre d'avaries.

83. — *Construction des boîtes à feu.* — Chaque boîte à feu se compose de deux fonds plats et d'une enveloppe cylindrique de forme assez variable.

Les deux fonds plats portent généralement les pinces d'assemblage, sans toutefois que ce soit là une règle absolue. Des six faces de la boîte, la première, la plaque de tête, est assujettie par les tubes, la seconde, le ciel, a un mode de tenue particulier; les quatre autres sont des parois de lames d'eau, et nous nous occuperons d'elles tout d'abord.

Les lames d'eau, à parois planes espacées de 15 à 20 centimètres, résistent bien aux plus hautes pressions en usage, à cause de la facilité de tenir les deux parois l'une sur l'autre par des boulons d'entretoises. Ces boulons sont des tiges vissées dans les deux tôles; leurs trous ne sont taraudés qu'après le montage des tôles; quand celles-ci sont assemblées entre elles d'une manière absolument rigide.

Sur un certain nombre de chaudières et principalement sur les chaudières de torpilleurs (type locomotive), les entretoises sont creuses afin de produire une fuite de vapeur, lorsque l'une d'elles est rongée où vient à se rompre. Du côté du foyer, le trou de l'entretoise est de très petit diamètre, ce qui réduit la fuite de vapeur, et évite les projections de flammes par les portes de foyers.

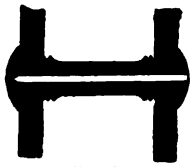


Fig. 68

Les boulons d'entretoises sont espacés de $0^{m},20$ environ, d'axe en axe, ce qui suffit pour éviter les effets de capitonnage trop marqués. Leur diamètre est de 30 millimètres; la charge pour une pression de 12 kilogrammes est ainsi de $4^{k}8$, par millimètre carré. Plus le pas est fin, plus la section travaillante reste forte; mais on ne descend pas au-dessous du pas de 2 millimètres, pour que les filets ne soient pas trop exposés à se ronger. En plus du filetage, on a soin aujourd'hui de munir tous les boulons d'entretoises d'une tête d'un côté de la lame d'eau, et d'un écrou de l'autre; cette précaution assure absolument la tenue du boulon, mais elle ne dispense pas du taraudage dans les tôles, qui donne seul l'étanchéité. Dans les boîtes à feu, il faut avoir soin de ne mettre aucun joint au mastic sous les écrous et les têtes : les têtes transmettent ainsi mieux la chaleur et sont moins exposées à se brûler.

Pendant longtemps, on s'est contenté du filetage, comme tenue. L'entretoise, vissée avec une clef à douille, était ensuite arrasée à ses deux extrémités et rivée; la petite tête formée au marteau était peu exposée à

se brûler et encombrait moins que les têtes et les écrous actuels ; mais la tenue, réduite en réalité à celle du filetage dans les tôles, était insuffisante. Dans une entretoise, quelques filets, ceux voisins de l'extérieur, restent seuls en prise, quand l'effet de capitonnage commence à se produire, et cela, plus particulièrement, si le filet est fin ; la figure 69 le montre suffisamment, en exagérant l'effet produit. Il y a eu des explosions de chaudières provenant de ce fait, quand les entretoises étaient dépourvues d'écrous.

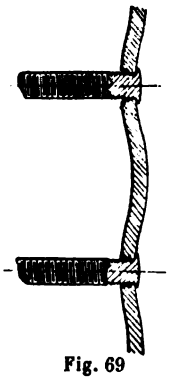


Fig. 69

Les entretoises, toujours beaucoup plus rapprochées les unes des autres que les tirants, soutiennent mieux les tôles et permettent de donner à celles-ci une épaisseur moindre ; mais elles gênent les mouvements de l'eau, et elles peuvent, par leur proximité, permettre la soudure entre les dépôts qui se forment autour de chacune d'elles.

La tenue de la plaque sera étudiée à l'occasion des tubes et de leur emmanchement.

Le ciel de la boite à feu, éloigné de toute tôle pouvant lui fournir des points d'appui, soumis à une température élevée, exige d'autant plus de soin qu'il forme la première partie de l'intérieur de la chaudière qui découvre, quand le niveau de l'eau vient à baisser. Il faut proscrire, tout d'abord, toute armature en tôles et cornières doublant l'épaisseur du métal et augmentant par suite le danger des coups de feu.

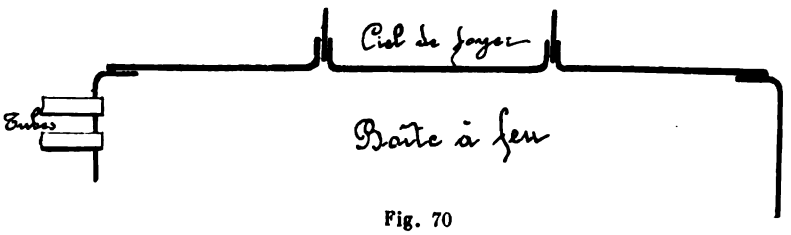


Fig. 70

On a quelquefois constitué l'enveloppe de la boite à feu, de tronçons à pinces rabattues avec une rondelle de tôle interposée, à l'exemple de ce qui s'est fait pour les foyers, figure 70. On a même fait des enveloppes en tôle ondulée. Ces dispositions compliquées ne se sont pas répandues, bien qu'elles présentent un avantage important, celui de permettre aux dilatations de se produire, sans déplacement de la plaque de tête et sans fatigue pour les emmanchements des tubes.

Sur le *Forbin*, au moyen de plombs-témoins disposés dans les chaudières, on a relevé les aplatissements d'un soufflet placé dans la boite à

feu; ils dépassaient 1 millimètre. En même temps, dans les foyers, on observait des gondolements de 18 à 25 millimètres de flèche. Nous donnons figure 71 le croquis d'une boîte à feu du *Marceau*, où la disposition du soufflet est semblable à celle des chaudières du *Forbin*.

Marceau

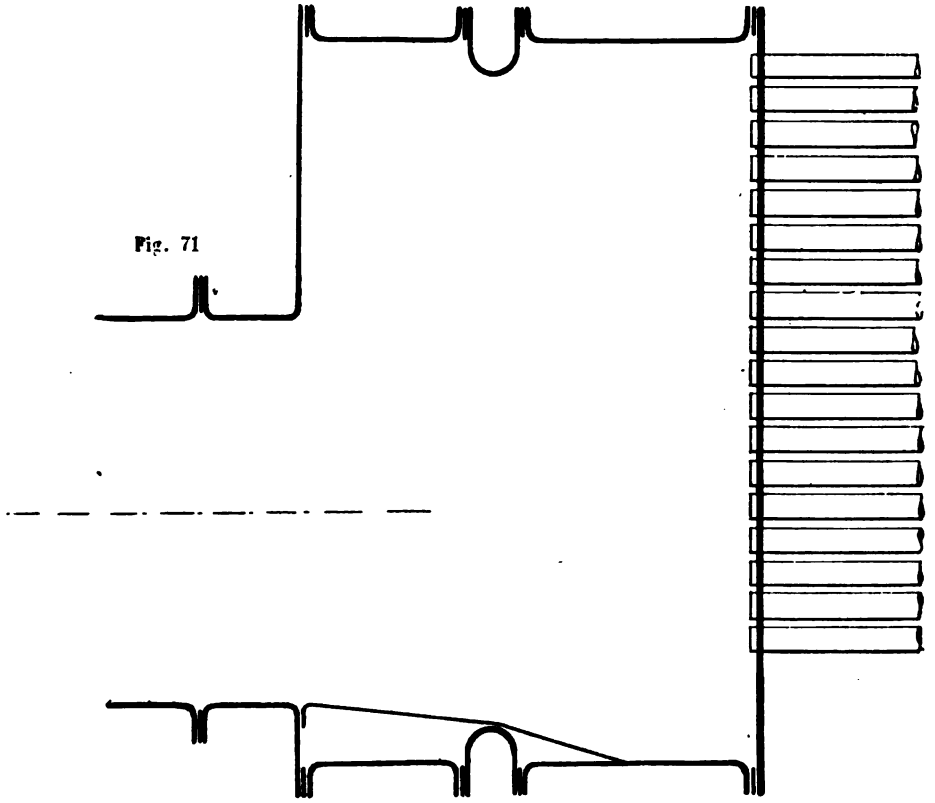


Fig. 71

Quelquefois on s'est contenté de suspendre le ciel de la boîte à feu à l'enveloppe de la chaudière, par des tirants filetés dans le ciel et munis de contre-écrous dans la boîte à feu. Ces tirants se dilatent plus que l'enveloppe de la chaudière; la boîte à feu elle-même se dilatant plus encore, les tirants commencent par comprimer le ciel et ne peuvent le soutenir que lorsqu'il a commencé à se gondoler sous la pression de la vapeur. De là une défiance légitime, que l'accident arrivé à un ciel de foyer de chaudière type locomotive à bord du torpilleur 120, en septembre 1894, ne peut qu'augmenter; l'alimentation ayant manqué, le ciel s'est gondolé en rompant un tirant, et tous les tirants voisins ont manqué à la suite du premier.

La disposition la plus répandue consiste à armer le ciel de la boite à feu de fermes écartées de la tôle et portant sur les deux parois avant et arrière de la boite. Ces fermes servent de point d'appui à des boulons de suspension convenablement distribués. La construction des fermes varie. On emploie quelquefois une pièce unique en acier moulé, présentant des renflements pour le passage des boulons. Plus fréquemment, chaque

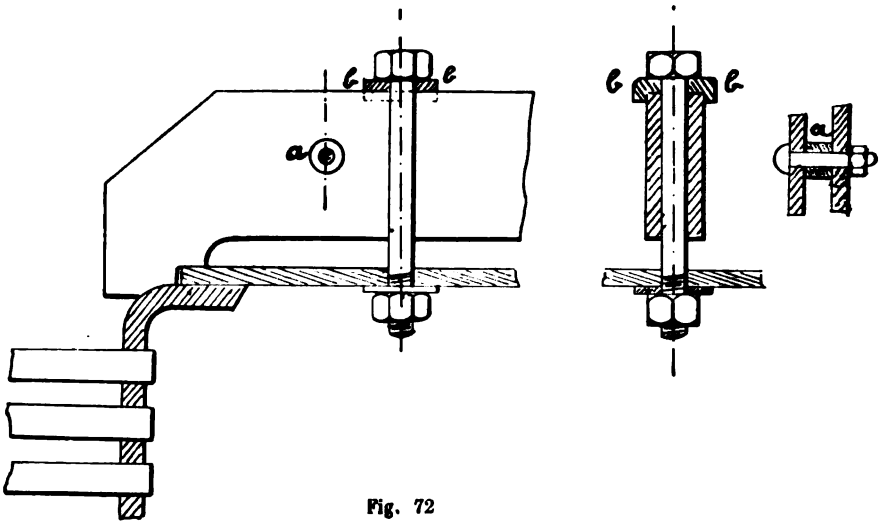


Fig. 72

Sfax

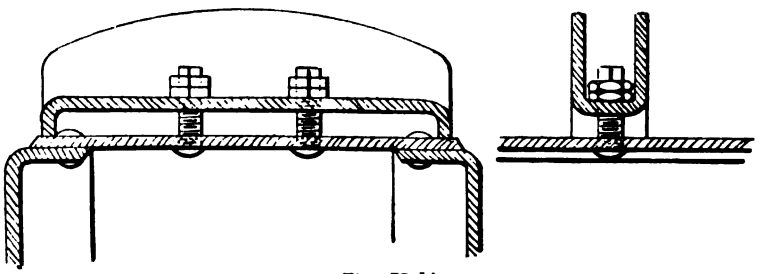


Fig. 72 *bis*

ferme se compose de deux flasques en fer forgé, entre lesquelles passent les boulons, figure 72; les deux flasques sont tenues d'écartement par des entretoises *aa* et par des tablettes à bords rabattus *bb*, sur lesquelles repose la tête des boulons. Enfin les fermes se réduisent quelquefois simplement à une tôle emboutie, ainsi que le représente la figure 72 *bis*.

Les fermes travaillent à la manière d'armatures rigides, reportant sur les deux cloisons avant et arrière, la totalité de la pression exercée sur le ciel. Pour soulager ces cloisons, on a quelquefois, par exemple sur le

Cécille, combiné le système des fermes et celui des tirants, ainsi que le représente la figure 73; mais on retombe alors dans les inconvénients des tirants.

La figure 54 représente une disposition de boîte à feu, dans laquelle la forme du ciel concourt à assurer sa résistance à la compression.

Les figures précédentes sont empruntées à des chaudières à retour de flamme.

Cécille

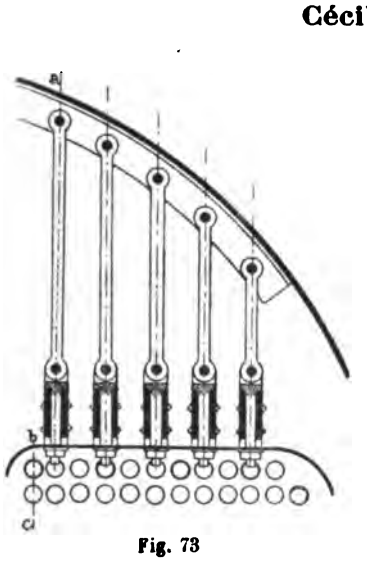


Fig. 73

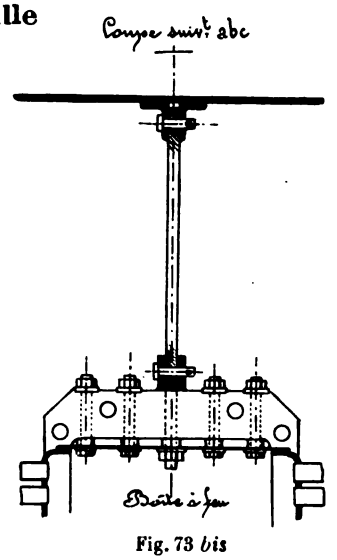


Fig. 73 *bis*

Sur les chaudières à flamme directe, les ciels de boîtes à feu, très voisins du ciel des foyers, sont violemment chauffés, et leur construction exige encore plus de soins que les autres.

84. — *Tubes. Modèles divers. Distribution.* — Les tubes des chaudières reçoivent les gaz chauds au sortir de la boîte à feu, et sont le principal siège de la transmission de la chaleur, de la flamme à l'eau. Ils remplissent d'autant mieux leur office de refroidir la flamme qu'ils sont plus étroits et plus longs; l'étude de leur diamètre et de leur longueur, se rattache donc à celle du fonctionnement. Nous nous bornerons à rappeler ici que le diamètre intérieur varie, dans la pratique, de 50 millimètres à 85 millimètres, et qu'il y a une tendance, dans la marine française, à adopter les petits diamètres.

Au point de vue de la construction, les principales questions à étudier sont celles de la nature du métal, de la distribution et du mode d'attache.

Les tubes de chaudières sont en fer, en acier, ou en laiton.

Les tubes en fer ou en acier coûtent moins cher que ceux en laiton,

et n'ont pas en pratique d'infériorité sensible sous le rapport de la transmission de la chaleur. Sous l'épaisseur de $2^{mm},5$, la même que celle des tubes en laiton, ils ont une bonne durée, trois ou quatre ans sur les chaudières soumises à un service continu. Actuellement, ils sont à peu près exclusivement employés sur les paquebots. On a beaucoup discuté sur les mérites respectifs des tubes en fer et des tubes en acier, sans arriver à une conclusion nette. Les tubes, en acier un peu dur et raide, avaient l'avantage de pouvoir être retirés sans déformation et remis en place, lorsqu'on employait le mandrin conique ordinaire pour le forcement ; mais actuellement, par l'emploi du procédé Caraman, on assujettit tellement bien les tubes en place, qu'il faut pratiquer une saignée pour les enlever, et l'on ne peut les employer de nouveau qu'après *raboutage*.

Les tubes en acier sont électro-négatifs en présence du fer, et doivent par suite avoir moins de durée que ceux en fer ; on croit avoir constaté les effets de cette action galvanique.

Les tubes en fer reçoivent quelquefois un raboutage en cuivre rouge, destiné à donner de meilleurs joints sur les plaques de tête, et une étanchéité qui croît avec la température par l'effet de la dilatation. Cette pratique, qui avait surtout sa raison d'être avec les foyers en cuivre, tend aujourd'hui à disparaître.

Les tubes en laiton ont le désavantage du prix. Ils perdent beaucoup de leur résistance à la température de 200°. Leur avantage principal est dans leur durée ; si le métal est bien homogène, ils peuvent user plusieurs chaudières en subissant un simple raboutage en laiton ou en cuivre. Ils ont surtout le précieux avantage de résister aux longs chômages des chaudières, pendant lesquels les tubes en fer ou en acier sont exposés à se piquer et à se percer ; cette dernière propriété désignerait les tubes en laiton pour les navires de guerre. Ajoutons que les tubes en laiton ne produisent aucun effet galvanique pernicieux, et que leur dilatation plus grande ne paraît pas non plus avoir en pratique d'inconvénient appréciable, au point de vue d'un accroissement de fatigue des joints dans les plaques de tête. Sur le *Condor*, on a employé, des tubes en fer comme tubes tirants, et des tubes en laiton comme tubes ordinaires, sans inconvénient marqué pour la tenue sur la plaque de tête.

Il y a eu, dans ces dernières années, grande hésitation au point de vue du métal des tubes pour les bâtiments de guerre. Ainsi l'*Isly* a reçu des tubes en laiton, le *Davout*, le *Cécille*, le *Wattignies* des tubes en acier raboutés en cuivre, le *Hoche* et le *Marceau* des tubes simplement en acier.

L'application la plus défavorable à l'acier a été celle du *Marceau*, dont les tubes se sont trouvés en grande partie percés, à la fin de la période

d'essai, lors du voyage à Cronstadt: mais depuis lors, les précautions prises pour tenir les chaudières pleines d'eau à réaction alcaline ont assuré une beaucoup meilleure conservation des tubes en fer ou en acier. Les paquebots font de préférence usage du fer ou de l'acier, à cause de la question de prix; cependant quelques constructeurs américains reviennent au laiton.

Il serait très important, surtout avec l'acier, de généraliser l'emploi des tubes sans soudure tirés d'une plaque enboutie ou d'un lingot percé ; on n'est arrêté que par la question de prix. On recommande aussi pour l'acier, de n'employer que la qualité la plus douce, de 40 kilogrammes de résistance à la rupture au maximum ; les aciers durs sont inférieurs au fer. Les ferro-nickels à 25 %, inattaquables par l'eau de mer, fourniront une solution parfaite, quand on sera parvenu à les travailler.

Afin d'augmenter la surface de contact du métal et des gaz chauds, on emploie quelquefois les tubes à ailettes, ou tubes Serve, dont la section est représentée figure 74. Les tubes Serve ont une surface d'absorption de la chaleur supérieure de 75 % à celle des tubes ordinaires, pour une même surface extérieure de distribution de la chaleur; de là, une meilleure utilisation de la chaudière, qui, d'après l'expérience de plusieurs années de service sur diverses lignes de paquebots, se traduit par une économie de 10 % dans la consommation de charbon par cheval.

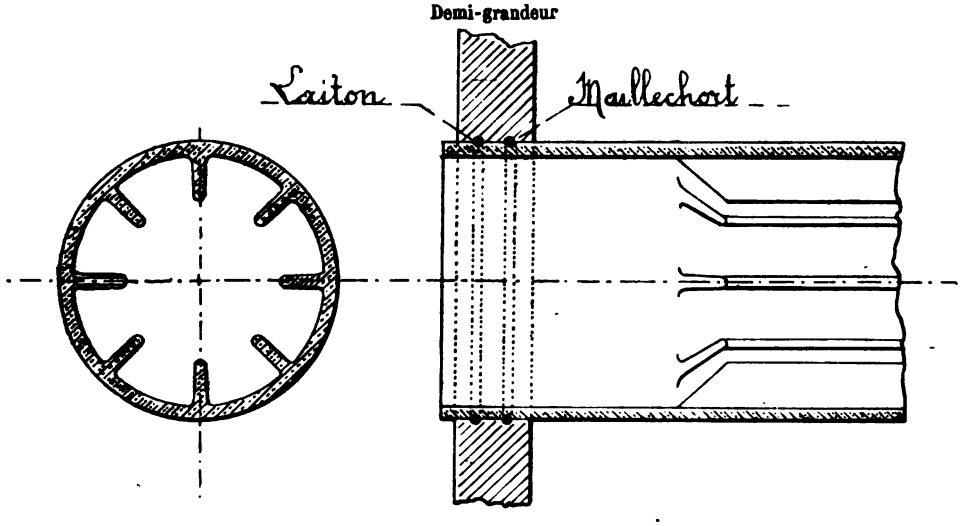


Fig. 74

Les ailettes des tubes Serve sont abattues, près des extrémités, sur une longueur de $0^m,30$ environ, afin de permettre l'introduction de l'outil, mandrin conique, Dudgeon, ou Caraman (fig. 74).

La résistance des tubes Serve à la flexion a fait craindre que leur raideur ne fût une cause de fatigue excessive pour leur emmanchement. Mis en essai sur le *Fleurus*, ils ont donné des fuites dans les plaques de tête; sur quelques paquebots, au contraire, ils ont fonctionné plusieurs années, au tirage forcé, sans donner lieu, selon M. Ellis, à aucun accident; sur les locomotives américaines, auxquelles on les a appliqués, on a observé une diminution des fuites aux plaques de tête.

Sur les chaudières tubulaires, les tubes Serve ont leurs ailettes du côté où la transmission de la chaleur se fait le plus difficilement, ce qui les rend efficaces. Les ailettes se trouvent au contraire mal placées sur les chaudières tubuleuses.

Les spirales Guébhard sont des lames minces de laiton, tordues en hélicoïdes, que l'on a placées quelquefois dans les tubes; elles brassent les gaz et font passer tous les filets sur les parois, sans rien changer d'ailleurs à la surface d'absorption de la chaleur.

On a quelquefois donné aux tubes une légère courbure dans le sens longitudinal, afin de les rendre flexibles et déformables sans fatigue à la dilatation. Cette disposition, qui n'est pas applicable aux tubes tirants, n'a pas présenté d'avantage, bien qu'elle semble rationnelle.

Les tubes présentent deux modes de distribution, la disposition rectangulaire et la disposition en quinconce.

La disposition en quinconce permet de loger un nombre de tubes plus grand dans le rapport $\sqrt[2]{\frac{4}{3}}$ ou 1,15, à distance égale d'axe en axe et par suite à largeur égale de la bande de tôle entre deux tubes. Le désir exclusif de développer le plus possible la surface de chauffe a longtemps fait préférer la disposition en quinconce, et fait réduire en même temps l'écartement des tubes au strict minimum imposé par les nécessités de construction. Plus tard, on s'est préoccupé de mieux assurer le dégagement des bulles de vapeur, et on s'est résigné quelquefois à perdre une partie du bénéfice de la disposition en quinconce, en espaçant d'avantage les tubes. La disposition rectangulaire est plus favorable au dégagement des bulles de vapeur, à la circulation, et, par suite, à la transmission de la chaleur.

Comme exemples de la disposition en quinconce, on trouve les chaudières du *Marceau* et du *Davout* (type Amirauté) et les chaudières réglementaires cylindriques modèle 1877 à retour de flamme. La figure 75 représente les tubes d'une chaudière réglementaire; le diamètre extérieur est de 75 millimètres ($70 + 2{,}5 \times 2$); l'espacement d'axe en axe est de 101 millimètres, ce qui laisse 26 millimètres de tôle entre les bords de deux tubes voisins. Le *Cécille* (modèle à double façade), le

Hoche (modèle Amirauté), le *Goëland* (retour de flamme), etc, présentent la distribution rectangulaire (fig. 75 *bis*). Sur les chaudières du *Goëland*, les tubes ont 85 millimètres de diamètre extérieur ($80+2{,}5\times2$), et sont écartés de 108 millimètres, ce qui ne laisse que 23 millimètres de tôle entre eux.

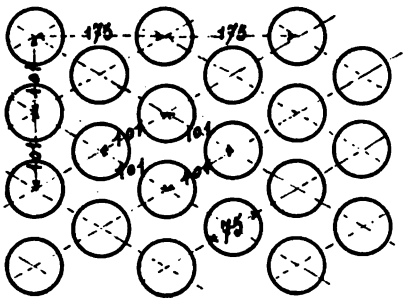


Fig. 75

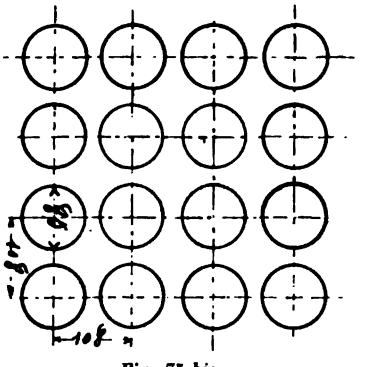


Fig. 75 *bis*

Aujourd'hui, l'avantage prédominant d'une bonne circulation étant reconnu, la disposition rectangulaire est généralement préférée. On supprime même souvent une file verticale de tubes au-dessus de l'axe de chaque foyer, afin de faciliter le dégagement des bulles formées sur le foyer, qui paraissent constituer environ le tiers de la production totale de vapeur. On a constaté sur le *Sfax*, où cette suppression a été pratiquée après coup, la disparition complète des entraînements d'eau qui se produisaient auparavant.

En Amérique, où la distribution rectangulaire est seule employée, on donne aux tubes plus d'écartement dans le sens horizontal que dans le sens vertical, afin de bien faciliter le mouvement des bulles de vapeur ; ainsi, sur le *Minneapolis*, les tubes, de 57 millimètres de diamètre extérieur, ont leurs lignes horizontales espacées verticalement de $76^{mm},86$, tandis que leurs colonnes verticales sont distantes de $95^{mm},2$.

Les tubes découpent, comme on voit, les plaques de tête, de manière à leur laisser seulement le tiers, ou même le quart, de leur section ; cela n'a pas une très grande importance, parce que les grands affaiblissements locaux produits par le passage des foyers sont certainement encore plus nuisibles à la solidité générale.

85. — *Emmanchement des tubes et protection de leurs joints.*— L'emmanchement des tubes dans les plaques de tête, exige une étude particulièrement soignée, et constitue aujourd'hui la partie la plus délicate de la construction des chaudières cylindriques.

Jadis, quand la température ne dépassait pas 120°, et que la pression était de deux atmosphères, quand, de plus, le tirage forcé était inconnu,

on perçait dans les plaques de tête des trous, ronds ou ovales, d'un millimètre plus grands que les tubes, lesquels n'étaient pas eux-mêmes exactement circulaires. On plaçait le tube, on le forçait à accoster avec un mandrin conique, chassé simplement à coups de masse, puis on le fixait définitivement, en introduisant une bague en fer légèrement conique, qui l'empêchait de se resserrer; de plus, sur les bâtiments de guerre, et seulement du côté de la boite à feu, on rivait le tube en dehors comme l'indique la figure 76.

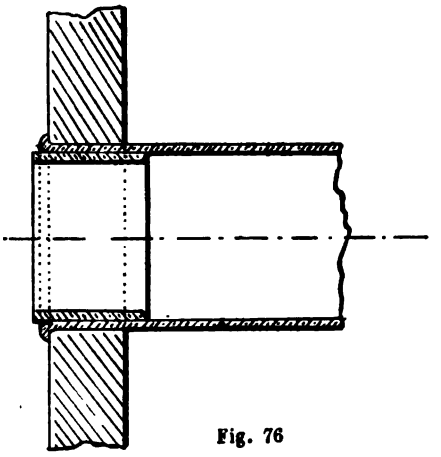


Fig. 76

On réalisait ainsi, à peu de frais, une étanchéité suffisante et une adhérence si parfaite que des ingénieurs ont pu avancer que les tubes-tirants ne constituaient qu'une précaution inutile. Il y eu, à cette époque, plusieurs systèmes de tubes démontables appliqués avec succès.

Avec les températures croissantes de la vapeur, et surtout avec les intensités de combustion dues au tirage forcé, les joints se sont mis à manquer partout. Les fuites d'eau ont rongé les tôles, et agglutiné la suie, en forme de nids de pie compacts, qui obstruent les tubes: elles ont été souvent jusqu'à produire des cascades ruisselant dans les cendriers, et tombant dans la chambre de chauffe où elles causaient plus de peur que de mal, mais où elles obligeaient, par prudence, à mettre bas les feux sans retard. Dans quelques circonstances, ce décollage des joints, dans lequel par bonheur les tubes tendent toujours à sortir et non à se démancher, est devenue une avarie redoutable, puisque les fuites de vapeur ont été assez fortes pour renvoyer la flamme des foyers dans la chambre de chauffe, même à l'encontre du tirage forcé.

Pour améliorer la tenue des tubes, on a perfectionné le mandrinage, en employant les appareils à galets, système Dudgeon, qui, prenant sur trois génératrices seulement à la fois, donnent un forcement beaucoup

plus énergique que le mandrin qui porte partout; on est arrivé ainsi à produire sur les tubes un petit épaulement, en avant de la plaque de tête (fig. 77), disposition surtout adoptée pour les tubes tirants. Le mandrin Dudgeon a été perfectionné par M. Caraman, dont l'outil porte des galets cylindriques disposés obliquement sur l'axe du trou, et avance automatiquement dans le cours du travail. Avec le mandrin Caraman, on peut pousser la pression, jusqu'à la limite extrême des résistances de la plaque de tête à la rupture. M. Caraman pratique de plus, dans l'épaisseur de la plaque, deux rainures circulaires et y insère deux anneaux, en fil de laiton et de maillechort, que le travail de mandrinage

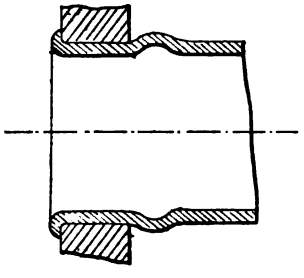


Fig. 77

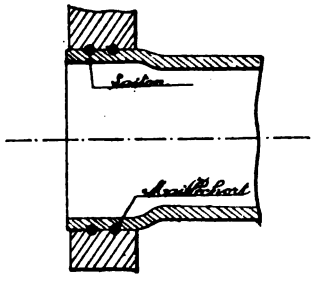


Fig. 78

incruste dans le métal des tubes (fig. 78). L'emploi du procédé Caraman rend inutile le raboutage en cuivre rouge, pour les tubes en laiton des chaudières type locomotives des torpilleurs, et permet de supprimer partout les tubes-tirants. Parfois les tubes sont raboutés en acier d'une épaisseur plus grande que le corps du tube. Les tubes caramanés ne se rivent jamais sur la plaque de tête, parceque le travail du marteau détruirait l'effet de l'outil Caraman.

On peut ainsi assurer la tenue des tubes avec les combustions les plus intenses, pourvu que la chauffe soit régulièrement conduite. Beaucoup de bâtiments ont supporté des essais de quatre heures, avec les tubes dudgeonnés ou caramanés, en brûlant 200, 250 et 275 kilogrammes de charbon par heure et par mètre carré de grilles. Mais, pour éviter les avaries, il ne suffit pas que les tubes aient été placés par des ouvriers habiles, il faut encore que la chauffe soit conduite par un personnel exercé, avec les chaudières à flamme directe surtout, qu'elles soient cylindriques ou du modèle locomotives. Les moindres incidents de chauffe, tels que l'ouverture trop prolongée d'une porte de foyer, ou la faible épaisseur du combustible en certaines parties de la grille, peuvent produire des rentrées d'air froid locales ou temporaires, toujours fatales à la tenue des tubes. Le remplacement des chauffeurs aux changements de quart est toujours un instant critique.

En résumé, la question de trouver un système sûr de joint pour les tubes est restée ouverte. On a essayé des tubes tous taraudés comme des tubes-tirants, et on n'y a trouvé qu'un palliatif coûteux mais insuffisant. On a même tenté, dans ces derniers temps, de souder à l'électricité les tubes en fer sur les plaques de tête, ce qui pourrait être la solution de l'avenir, si ce genre de travail devenait vraiment praticable. Enfin on a essayé de supprimer la cause même des accidents qu'il s'agit de prévenir, d'après les considérations suivantes :

La cause principale des avaries de joints de tubes paraît être dans la grande différence de température entre les plaques de tête et les tubes. La différence d'épaisseur du métal suffit, pour faire prendre à la plaque de tête une température plus élevée que celle de l'eau, de 100° environ dans les conditions normales. De plus, dans une chauffe active, la plaque se trouve isolée de l'eau, par un essaim de bulles serré formant lame de vapeur, tandis que l'emmanchement du tube, toujours refroidi par conductibilité, ne peut pas s'échauffer beaucoup plus que le corps du tube baigné par l'eau. Une plaque de tête atteint donc 400°, peut-être même 450°, autour d'un tube à la température de 250 à 300° au plus; le trou peut augmenter ainsi de diamètre, d'un dixième de millimètre et demi environ de plus que le tube (le métal étant supposé le même), et le joint se trouve compromis, quelle que soit la tension initiale produite par le mandrinage. Dans ces conditions, le joint doit manquer infailliblement, s'il se produit un refroidissement de la veine gazeuse, que le tube sentira bien avant la plaque. Presque toujours, la rupture du joint est accompagnée d'un glissement du tube dans son emmanchement, dû aux dilatations longitudinales, dont nous n'avons pas tenu compte, non plus que de la pression de la vapeur sur les tubes.

Quand la chaudière est refroidie, les tubes rentrent en place, et souvent la chaudière paraît étanche, même sous pression à l'eau froide; mais une nouvelle mise en pression à chaud ferait reparaître les fuites.

Il faudrait donc arriver à diminuer la différence de température entre les tubes et les plaques de tête. Plusieurs moyens ont été esssayés dans ce but.

Sur les vapeurs de la maison russe Nobel, qui naviguent sur le Volga et la Caspienne et chauffent au pétrole, on a obtenu de bons résultats en supprimant toute saillie du tube dans la chambre de chauffe et logeant la rivure dans l'épaisseur de la plaque de tête (fig. 79). On a abandonné en même temps les tubes-tirants, dont les écrous brûlaient comme les anciennes rivures, et on a supprimé les écrous et rondelles sur les entretoises.

En Amérique, on a prolongé les tubes dans la boite à feu, en les rabattant sur une bague évasée en forme de pavillon. On cherchait ainsi à donner au tube une température plus élevée (fig. 80).

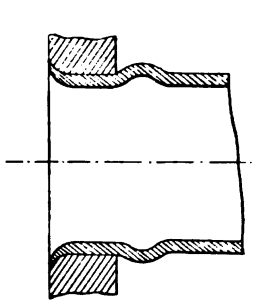


Fig. 79

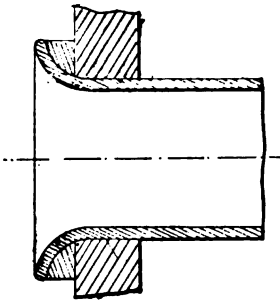


Fig. 80

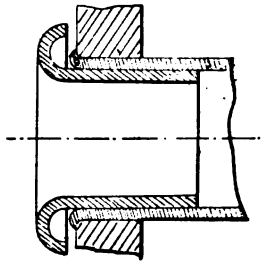


Fig. 81

En Angleterre, on a, au contraire, isolé le bord de la plaque voisin du tube, en le mettant à l'abri du contact des flammes, pour l'empêcher de s'échauffer. On a employé à cet effet, après avoir essayé une bague en porcelaine, une bague en fonte malléable terminée par un rebord recourbé, dite *ferrule de Chatham*, dont il existe plusieurs modèles dus à des inventeurs divers (fig. 81).

Les ferrules isolantes ont aussi été employées en France. La figure 82 représente celles qui ont été placées dans les chaudières du *Fleurus*. On voit que les tubes du *Fleurus* sont taraudés dans la plaque de tête; ce taraudage donne un mauvais contact métallique, et, rend les changements de tubes presque impossibles à cause de l'augmentation du diamètre du trou après réparation du filetage.

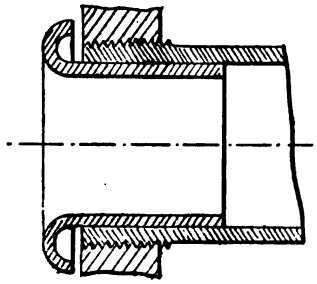


Fig. 82

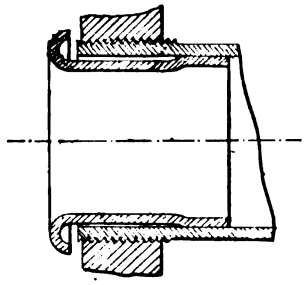


Fig. 83

Après tant d'études et de tentatives variées, on en est venu, pour éviter le danger d'avaries dans les emmanchements des tubes, à renoncer presque complètement à l'emploi du tirage forcé, ainsi que nous l'avons vu page 90. On a réduit ainsi la production de chaleur, dans les

foyers, à la moitié à peine de ce que des tubes bien proportionnés peuvent transmettre à l'eau, et au quart de ce que les chaudières des locomotives supportent sans avaries, aux mains de chauffeurs exercés. Ce peu d'aptitude à supporter le tirage forcé, dû à la faiblesse du joint des tubes sur la plaque de tête, met les chaudières tubulaires en état de sérieuse infériorité, par rapport aux chaudières tubuleuses à circulation accélérée.

Les précautions qui précèdent, insuffisantes pour l'emmanchement des tubes du côté de la boite à feu, sont au contraire superflues du côté de la boîte à fumée. Le trou est percé, avec un diamètre de 1 à 2 millimètres supérieur à celui du tube; un bon mandrinage suffit ensuite pour produire l'accostage et assurer l'adhérence.

86. — *Tubes-tirants.* — Nous avons considéré, jusqu'ici, les tubes ordinaires, destinés à donner passage aux gaz chauds et non à relier les cloisons de la chaudière, mais constituant toujours néanmoins une liaison d'une certaine importance. Il nous reste à parler des *tubes-tirants*, dont on s'est quelquefois dispensé sur les chaudières des bâtiments de commerce, et que l'emploi du système Caraman tend à rendre inutiles, à la condition d'être appliqué aux deux extrémités des tubes.

Les tubes-tirants sont destinés à assurer, d'une façon absolument invariable, la position relative des deux plaques à tubes. Ils sont ordinairement du même métal que les autres et d'une épaisseur double; l'augmentation d'épaisseur ne les expose à aucun accroissement de dilatation, pouvant se manifester par une fatigue quelconque aux emmanchements.

Autrefois les tubes-tirants étaient simplement tenus aux deux extrémités par deux écrous sur chaque face des plaques. Aujourd'hui, les plaques sont elles-mêmes filetées, et les écrous ne sont plus nécessaires, sinon comme contre-écrous. On se contente donc, soit d'un seul écrou, soit même d'une simple rivure. On fait les tubes-tirants plus épais de $1^{mm},5$ aux extrémités, afin que le filetage ne les affaiblisse pas. Les tubes-tirants sont naturellement beaucoup plus coûteux que les autres.

87. — *Tamponnage des tubes.* — Il arrive quelquefois, lorsque les chaudières sont sous pression, qu'il se déclare des fuites dans le corps même des tubes, soit par une piqûre accidentelle, soit par un défaut de soudure sur les tubes soudés suivant une génératrice, soit par une fente transversale, à la brasure pour les tubes raboutés. Autrefois, quand cet accident se produisait, on mettait bas les feux, et, si l'on n'avait pas le temps de procéder à une réparation immédiate, on bouchait les deux extrémités du tube avarié au moyen de tampons de bois coniques, que l'on chassait de force à coups de masse.

Les tampons de bois avaient une tenue incertaine, même au temps des chaudières à moyenne pression; ils ne sont plus applicables avec les pressions actuelles. On emploie aujourd'hui des tampons, dans lesquels les deux pièces obturatrices sont réunies par un tirant en une ou plusieurs pièces. Les figures 84, 85 et 86 représentent trois dispositifs,

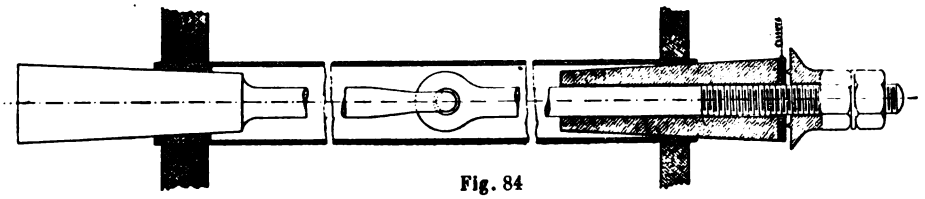


Fig. 84

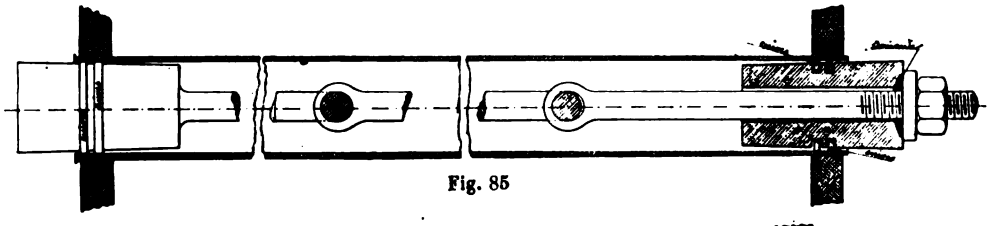


Fig. 85

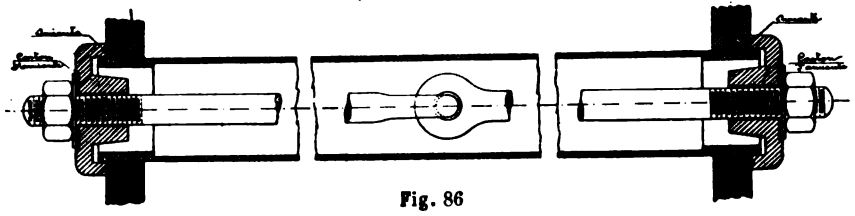


Fig. 86

dont les deux premiers donnent l'étanchéité par coincement et le troisième par serrage sur la plaque de tête. Dans les trois cas, l'introduction des tampons se faisant par la boite à feu, la mise bas préalable des feux est indispensable.

Pour permettre de tamponner en marche, M. Houille, mécanicien de la

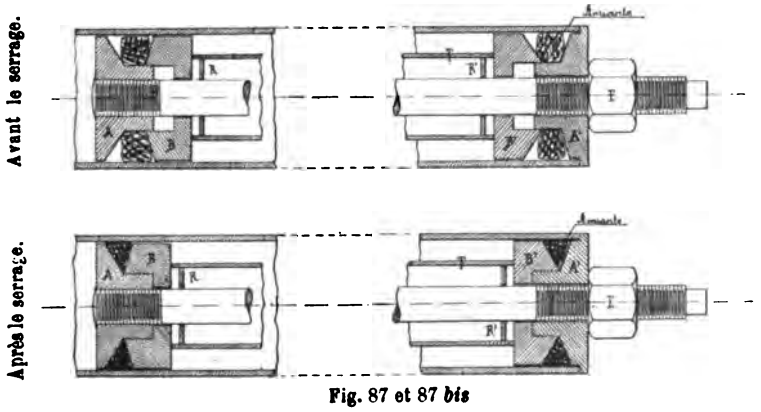


Fig. 87 et 87 *bis*

marine, a imaginé une disposition à presse-étoupes, représentée figures 87 et 87 *bis*. L'obturation est obtenue au moyen de rondelles d'amiante, serrées entre deux blocs métalliques A et B, qui appliquent la matière plastique contre la paroi interne du tube. On maintient la garniture antérieure à la position convenable, au moyen d'un tube creux T, qui est centré par les rondelles R,R'. Lorsqu'on opère le serrage avec l'écrou E, l'aplatissement de l'amiante se produit simultanément aux deux extrémités du tube.

Un autre modèle, conduisant plus simplement au même résultat, mais moins étanche, est celui de M. Latil représenté figures 88, 88 *bis*, 88 *ter*. Il consiste en un obturateur articulé, qui s'introduit fermé par le tube, et qui s'ouvre dans la boite à feu quand l'opérateur agit par traction. Du côté de la boite à fumée, une rondelle en caoutchouc, serrée entre deux disques donne une étanchéité convenable, pendant la mise en place. La mise en place de ce dernier tampon se fait en moins de cinq minutes.

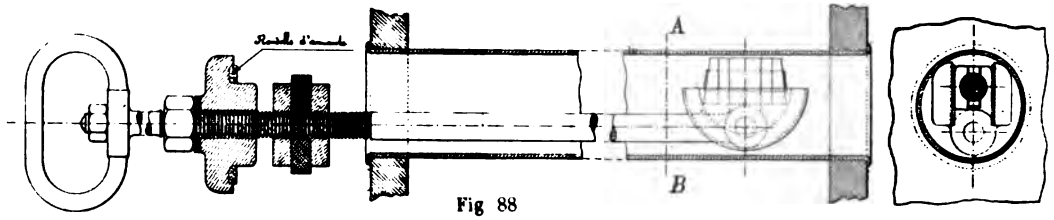


Fig 88

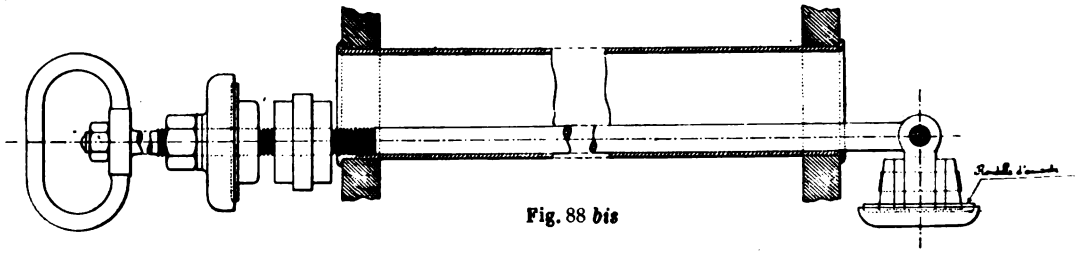


Fig. 88 *bis*

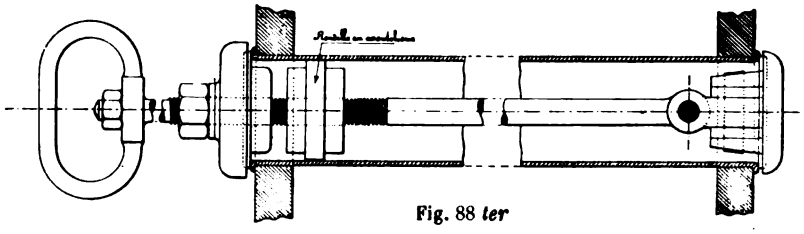


Fig. 88 *ter*

La possibilité de tamponner les tubes, sans vider les chaudières, est un avantage très apprécié des chaudières tubulaires. Cette opération est impossible sur les chaudières tubuleuses.

88. — *Conduits de fumée. Danger du refroidissement brusque dans la boîte à fumée.* — En sortant des tubes, les gaz de la combustion entrent dans la boite à fumée, canal de forme trapézoïdale, appliqué sur la façade de la chaudière, qui les conduit à la cheminée.

La boite à fumée présente, en face des tubes, une large ouverture fermée par une porte à deux battants destinée au ramonage.

Le ramonage, déjà décrit au n° 48, est une opération pénible pour les hommes, et fatigante pour la chaudière dont elle interrompt le fonctionnement. Le tirage cesse en effet dans la chaudière, et se produit directement dans la chambre de chauffe, dès que la porte de la boite à fumée est ouverte. Avant de ramoner, on laisse tomber les feux pour ne pas s'exposer à des refroidissements trop brusques.

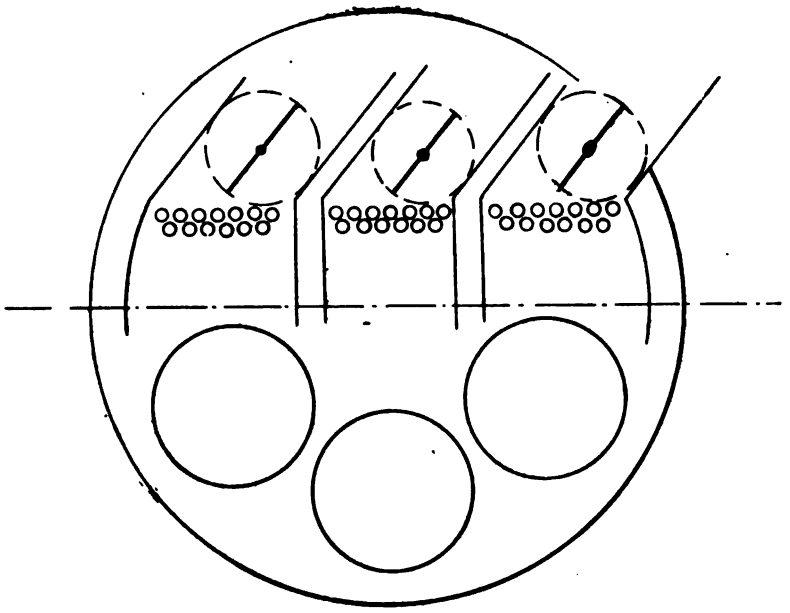


Fig. 89

Le ramonage doit se faire le plus vite possible et en opérant sur les diverses chaudières successivement.

Afin de n'interrompre la marche que d'un foyer à la fois pendant le ramonage, mais surtout pour ne pas laisser les foyers solidaires les uns des autres, au tirage forcé, on a quelquefois cloisonné la boîte à fumée, de manière à donner son conduit de fumée séparé à chaque foyer. On munit alors chaque conduit de fumée partiel d'un registre, pour éviter toute rentrée d'air froid par une porte ouverte, pouvant altérer le tirage de la cheminée (fig. 89). Cette disposition, rationnelle mais compliquée, ne s'est pas répandue.

En ouvrant les portes des boites à fumée, on peut faire cesser presque instantanément la production de vapeur d'une chaudière, et éviter ainsi la gêne d'un échappement bruyant par le tuyau d'émission, quand la machine stoppe à l'improviste. Cette manœuvre, qui pendant longtemps s'est faite avec la plus grande imprudence, doit être sévèrement proscrite, sur les chaudières tubulaires, à cause de la fatigue qu'elle impose à une chaudière dont les feux sont en pleine activité. On n'a pas oublié le terrible accident des chaudières de la *Revanche*, dont le coffre à vapeur s'est brusquement déchiré au moment où l'on venait d'ouvrir les portes de boites à tubes.

La boite à fumée forme aujourd'hui un simple accessoire, comme la cheminée et les conduits de fumée, plutôt qu'elle n'est une partie intégrante de la chaudière. Il n'en était pas de même autrefois, sur les chaudières rectangulaires, dont le haut de la boite à fumée était entouré par le coffre à vapeur. L'abandon de cette disposition a été une grande simplification pour la construction.

89. — *Enveloppe extérieure des chaudières.* — Les divers éléments intérieurs de la chaudière, que nous venons d'étudier, renferment les gaz de la combustion qu'ils chauffent sur une de leur faces, tandis qu'ils subissent, sur l'autre, la pression de la vapeur, qui fait travailler le métal par compression. L'enveloppe extérieure, en contact, d'un côté avec l'atmosphère, de l'autre avec l'eau et la vapeur, travaille au contraire par tension.

L'enveloppe extérieure se compose de deux parties, l'une cylindrique que l'on appelle simplement enveloppe, et l'autre plane qui comprend le fond et la façade.

L'enveloppe est la partie la plus importante, celle qui supporte les plus grands efforts ; c'est la seule pour laquelle on puisse faire des calculs de résistance approximatifs, conduisant à des résultats comparables d'une chaudière à l'autre. La résistance maximum que l'on peut donner aux enveloppes, en employant les tôles les plus épaisses qui se fabriquent et se travaillent, c'est-à-dire 30 millimètres il y a quinze ans avec le fer, 34 ou 36 millimètres aujourd'hui avec l'acier, détermine la pression maximum à laquelle on peut faire fonctionner les appareils moteurs munis de chaudières tubulaires.

Les coutures longitudinales des enveloppes sont étudiées avec un soin particulier, en vue de leur donner au moins 0,80 de la résistance des tôles. Elles sont presque toujours à franc bord avec couvre-joint double, et généralement trois rangs de rivets sur chaque lèvre, un rivet sur deux étant supprimé dans la rangée antérieure. Le diamètre et

l'espacement des rivets sont déterminés selon les règles usuelles de rivetage. La figure 90 représente une couture longitudinale avec couvre-joints égaux et à trois rangées de rivets; la figure 91 représente également une couture longitudinale, mais avec couvre-joints inégaux et deux rangées de rivets seulement.

Magenta

Exemple de couture longitudinale d'une enveloppe de chaudière.

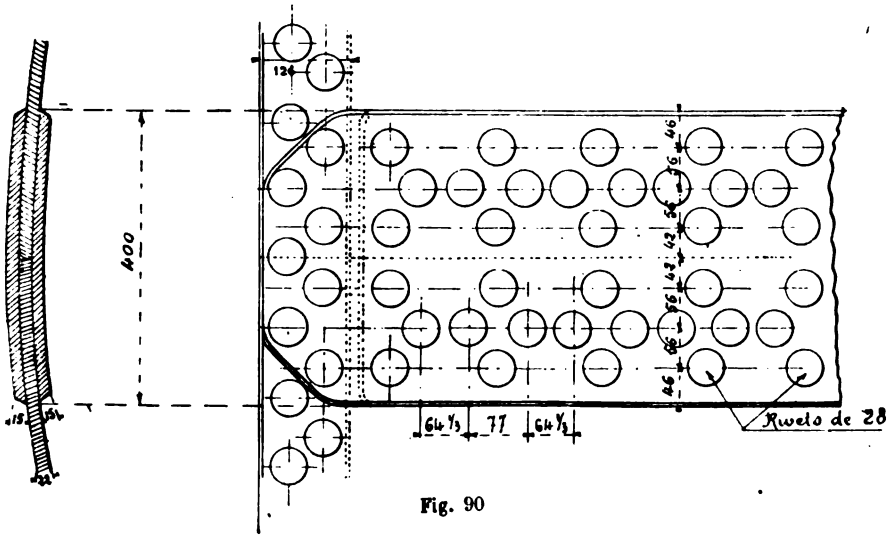


Fig. 90

Redoutable

Exemple de couture longitudinale d'une enveloppe de chaudière

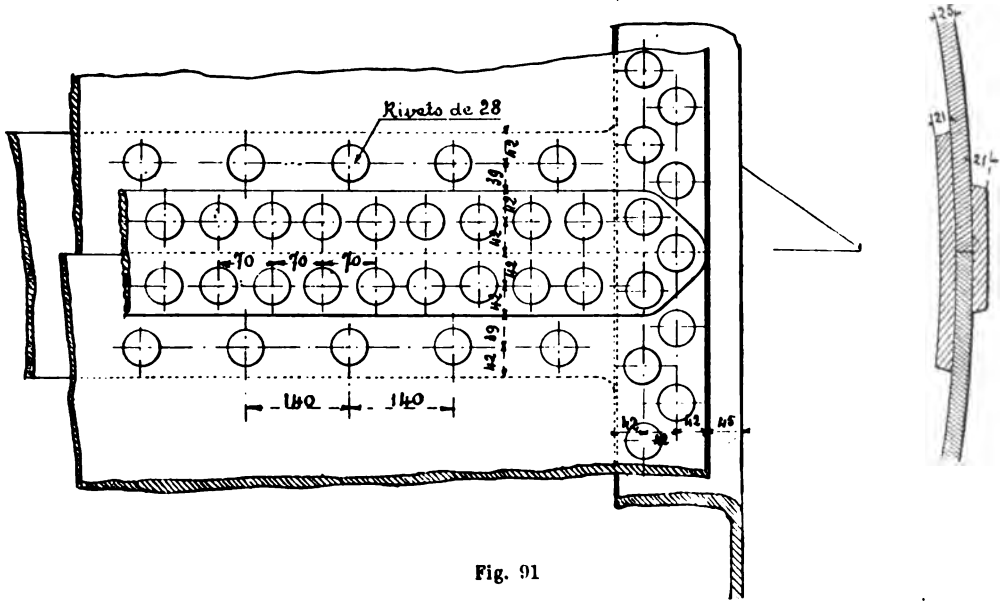


Fig. 91

Les coutures transversales, qui fatiguent beaucoup moins, sont à recouvrement et à deux rangs de rivets, rectangulaires ou en quinconce indifféremment.

La rencontre d'une couture longitudinale et d'une couture transversale se fait de diverses manières. La figure 92 présente la plus simple des dispositions en usage, mais non la plus solide. Le couvre-joint longitudinal intérieur est en général prolongé sur toute la longueur du joint transversal, comme l'indique la figure 93, de manière à augmenter, de *a b*, la longueur du joint longitudinal muni d'un double clin. Comme les derniers rivets aux extrémités des couvre-joints sont soumis à des fatigues particulièrement violentes, et que le matage en *c* est très difficile à maintenir étanche, on

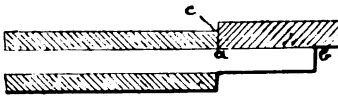


Fig. 92

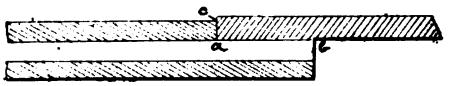


Fig. 93

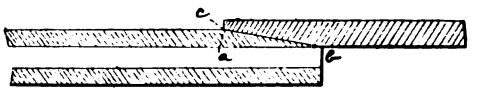


Fig. 94

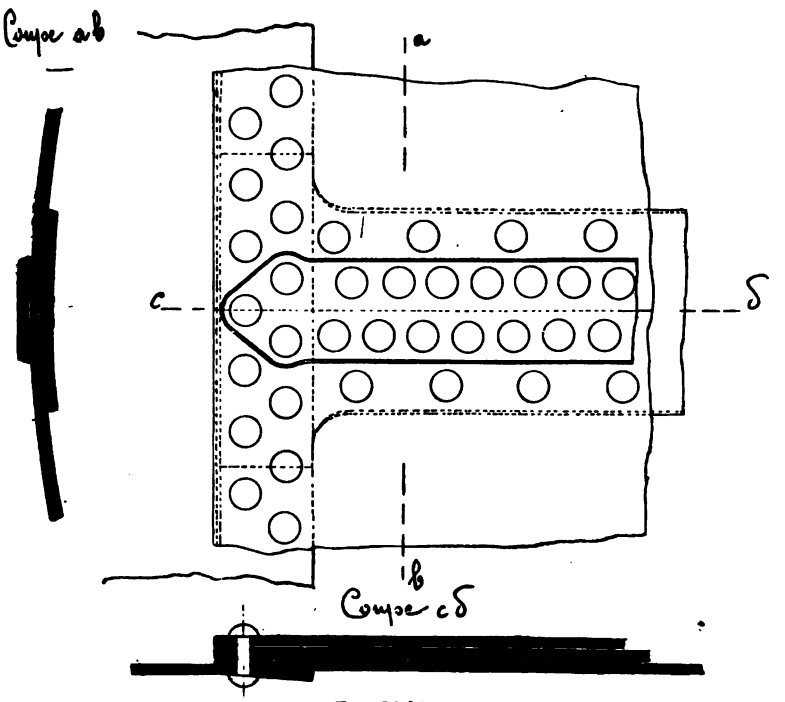


Fig. 94 *bis*

adopte avec avantage la disposition de la figure 94, qui s'oppose à tout glissement des tôles les unes sur les autres à l'endroit du matage en *c* ; on a même soin d'élargir les extrémités des couvre-joints, qui se trouvent ainsi pincées entre les deux tôles de l'enveloppe, ainsi que le représente la figure 94 *bis*.

Sur les deux faces planes, les coutures sont à double rang de rivets ; elles présentent toujours une résistance très supérieure à celle qui reste aux tôles elles-mêmes, dans les parties découpées par les tubes ou par les foyers. Les façades d'une seule pièce, quelquefois employées, constituent un tour de force d'usinage, plutôt qu'elles ne répondent à une nécessité de construction.

Les deux fonds, dans les parties non entretoisées, c'est-à-dire dans le coffre à vapeur et parfois sur quelques triangles de la partie inférieure, sont réunis ensemble par des tirants destinés à supporter toute la pression de la vapeur. Les tirants sont généralement espacés de $0^{m},40$ d'axe en axe, de manière à permettre le passage d'un homme ; ils sont fixés aux tôles par deux écrous, l'un en dedans, l'autre en dehors. L'écrou intérieur porte une simple rondelle, appliquée sur la tôle du fond avec un joint au mastic bien étanche ; le mastic est ici sans inconvénient. L'écrou extérieur, qui supporte tout l'effort, porte sur une plaque épaisse et large, souvent fixée par une couronne de rivets, et formant une consolidation locale qui s'oppose au capitonnage de la tôle autour du tirant.

L'enveloppe de la chaudière est fixée aux fonds par des pinces rabattues sur ces derniers. Les pinces des fonds sont façonnées avec des congés de diamètre un peu grand, non seulement pour diminuer la fatigue de

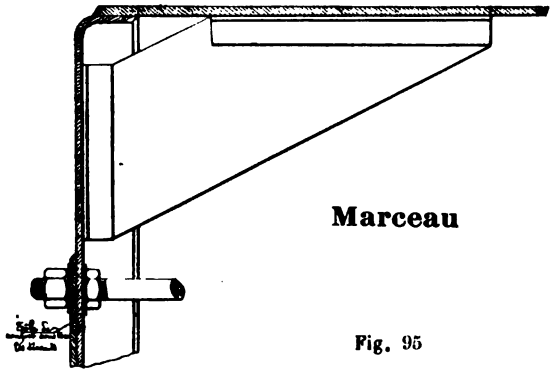


Fig. 95

la tôle, pendant le travail de la pièce, mais aussi pour donner au joint du fond et de l'enveloppe une élasticité, ou plutôt une flexibilité, à laquelle beaucoup de bons constructeurs attachent une grande importance.

Assez souvent, on a réuni l'enveloppe et les fonds par des écharpes en tôle et cornières, disposées, comme la figure 95 l'indique, en évitant de suivre le contour du congé pour simplifier le travail. Ces écharpes, en rendant le joint indéformable, suppriment toute l'élasticité du congé; leur utilité est donc plus que contestable; leur emploi paraît du reste abandonné.

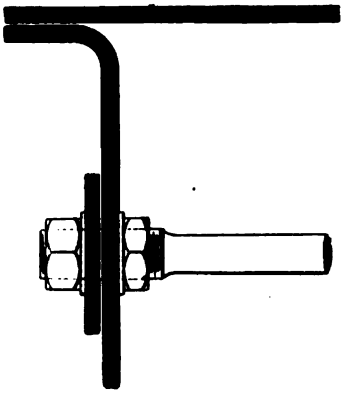


Fig. 96

La pince de jonction des fonds sur l'enveloppe est maintenant tournée le plus souvent vers l'extérieur de la chaudière, comme on le voit figure 96; cette disposition facilite le rivetage hydraulique.

Le rivetage des enveloppes des chaudières, s'il se distribue selon les règles générales, s'exécute avec des précautions toutes particulières. Il se fait entièrement avec les appareils hydrauliques. On se sert de riveuses fixes pour l'enveloppe cylindrique et la jonction de celle-ci avec le fond; pour les façades, on emploie des riveuses mobiles à longue portée, dont on introduit une branche par les trous des foyers; enfin, quand les foyers ont reçu la disposition de la figure 67, on les fixe sur la façade avec la riveuse hydraulique. Le travail, si brutal en apparence, de la riveuse hydraulique, peut se doser avec beaucoup de précision. La pression totale exercée doit être d'environ de 150 kilogrammes par millimètre carré de la section du rivet; si elle est trop faible, le rivet est mal écrasé, le trou mal rempli, et les tôles mal accostées; si elle est trop forte, le métal se refoule entre les deux tôles, qu'il écarte l'une de l'autre comme l'indique la figure 97. Pour éviter le défaut d'accostage, on emploie un accosteur concentrique à la bouterolle.

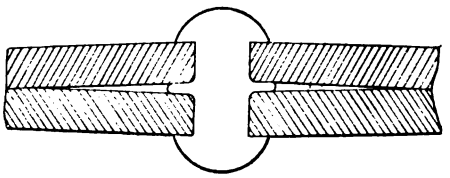


Fig. 97

Le matage des enveloppes extérieures, et de toutes les parties de la chaudière en général, exige une très grande habileté des ouvriers. C'est un travail assourdissant dans l'atelier, particulièrement pénible pour les ouvriers placés à l'intérieur des chaudières. On a employé, dans ces derniers temps, de petites mateuses, marchant à coups répétés par l'action

de l'air comprimé, qui suppriment la fatigue des hommes et diminuent beaucoup le bruit.

Le calcul de la charge des matériaux ne se fait guère que pour les enveloppes cylindriques, et en se plaçant dans des conditions hypothétiques rendant les équations très simples.

90. — *Résistance des enveloppes. — Charge des matériaux. — Inégalités de dilatation.* — On suppose généralement que les fonds et façades ne participent en rien à la résistance de l'enveloppe dans le sens du diamètre et, en même temps, que l'augmentation de diamètre produite est uniforme sur toute la longueur, en sorte que la tôle de l'enveloppe cylindrique est partout également chargée. Soit l la longueur, d le diamètre, e l'épaisseur de la paroi cylindrique; soit P la pression dans la chaudière et T la tension de la tôle par unité de longueur.

La charge suivant un plan diamétral est

$$l\,d\,\mathrm{P};$$

la résistance est

$$2\,l\,e\,\mathrm{T}.$$

On tire de là

$$2\,e\,\mathrm{T} = d\,\mathrm{P}$$

$$\mathrm{T} = \frac{d\,\mathrm{P}}{2\,e}.$$

On admet que les valeurs ainsi obtenues pour T sont, sinon exactes, du moins proportionnelles à la charge maximum et par suite comparables d'un navire à l'autre. La formule (1) donne :

CHAUDIÈRES à retour de flamme	P	d	e	$\frac{d\,\mathrm{P}}{2\,e}$	OBSERVATIONS
Cécille . . .	7k, 25	4m, 48	23mm, 5	5k, 95	Le calcul ne tient pas compte de la résistance des recouvrements Δl, dans les joints transversaux, qui s'ajoutent à l; il faudrait prendre : $\mathrm{T} = \frac{d\,\mathrm{P}}{2\,e} \times \frac{l}{l + \Sigma \Delta l}$
Isly . . .	9, 50	4, 14	30,	6, 55	
Chaudière Marshall.	11, 25	3, 83	27, 8	7, 76	
CHAUDIÈRES à tubes directs					
Marceau. .	6k,	3m, 50	22mm	4k, 77	Même observation que ci-dessus.
Davout . .	11, 2	2, 94	23	7, 16	La correction indiquée n'est généralement pas faite.
Wattignies.	11, 25	2, 87	23	7, 01	

Les tensions, qui ne seraient pas comparables d'un modèle de chaudières à l'autre, varient singulièrement pour les chaudières du même modèle.

Dans ces dernières années, on a beaucoup augmenté les valeurs de T. Cet accroissement de tension, bien qu'il ne menace pas directement la solidité de l'enveloppe, peut produire certaines dislocations intérieures.

L'augmentation de diamètre, supposée uniforme, serait, dans l'hypothèse considérée, égale à :

$$d \times \frac{T}{E} = \frac{d^2 P}{2e E}, \qquad (2)$$

en appelant E le coefficient d'élasticité.

Dans l'essai à froid des chaudières, qui s'opère à des pressions égales à 2 P, sans dépasser jamais P + 6 kilogrammes, on trouve, dans la partie médiane de la chaudière où se fait la mesure, une augmentation de diamètre supérieure à ce qu'indique la formule (2) et pouvant s'élever à 0,001 *d*. Or, une augmentation de diamètre atteignant 5 millimètres sur une chaudière de 5 mètres, ferait travailler fortement une plaque à tubes, dans les régions très découpées qui ont à fournir la presque totalité de l'allongement; elle fatiguerait beaucoup le ciel de la boite à feu, si celui-ci était tenu par des tirants.

Si les tôles de l'enveloppe cylindrique n'avaient à subir aucune autre tension que celle exercée suivant la perpendiculaire aux génératrices, l'allongement par unité de longueur dans ce sens,

$$\frac{T}{E},$$

serait accompagné, selon les génératrices, d'une contraction proportionnelle,

$$\frac{T}{E} \times \frac{1}{\mu};$$

le coefficient μ est généralement supposé égal à 3. Quand $\frac{T}{E}$ atteint 0,001 le raccourcissement

$$\frac{T}{E} \times \frac{1}{3}$$

atteint une valeur très appréciable ; il serait de 2 millimètres sur une chaudière à tubes directs de 6 mètres de longueur.

Il n'a jamais été observé, à ma connaissance, de raccourcissement

général de la chaudière. Les enveloppes subissent d'ailleurs un effort de traction longitudinale, exercé sur elles par les fonds, qui tend à combattre ce raccourcissement.

Mais il y a des contractions partielles, expliquant, d'une manière assez plausible, les fatigues locales qui se manifestent par des suintements, par exemple aux extrémités des couvre-joints longitudinaux. Considérons le couvre-joint longitudinal *a b c d* qui bute en *c d* contre l'anneau

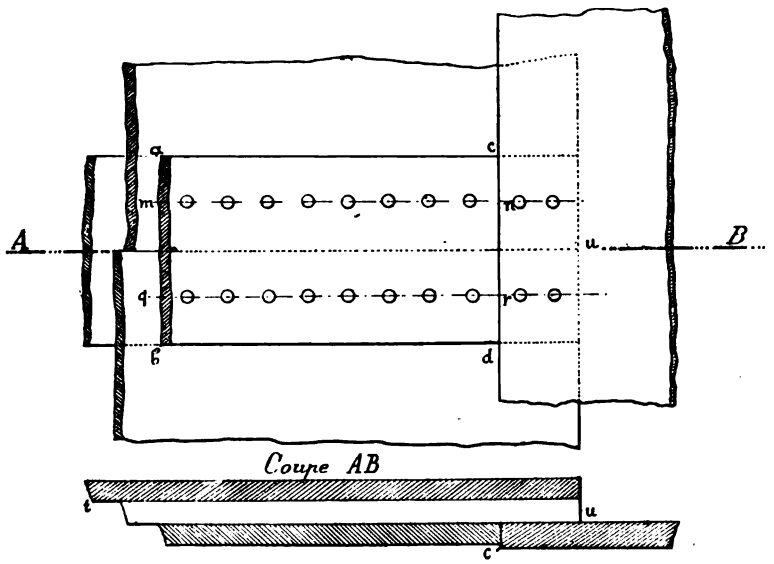


Fig. 98

suivant de l'enveloppe ; supposons le à un seul rang de rivets, ce qui ne modifie pas le raisonnement; *m n* et *q r* sont les axes des deux rangées de rivets uniques de chaque côté du joint *t u*. La portion *m n q r* du couvre-joint participe à l'allongement $\frac{T}{E}$ et par suite au raccourcissement général proportionnel au coefficient μ; mais les deux parties *a c m n* et *b d q r*, qui ne travaillent pas, gardent leur longueur; elles tendent donc à repousser violemment l'anneau voisin en *c n* et *r d*, et par suite à faire manquer le matage en *n r*. On peut trouver d'autres parties qui travaillent de manière à produire des tiraillements; nous nous bornons à indiquer ici l'effet le mieux constaté.

Les fonds tendent à produire, sur l'enveloppe cylindrique, l'effort

$$\frac{1}{4}\pi d^2 P.$$

Dans une chaudière dépourvue de tirants, la totalité de cette pression se transmettrait, en effet, à l'enveloppe qui subirait, de ce fait, une tension T' déterminée par l'équation :

$$\pi d e T' = \frac{1}{4} \pi d^2 P \tag{3}$$

$$T' = \frac{1}{4} \frac{d}{e} P = \frac{1}{2} T. \tag{4}$$

Au lieu de se contracter, l'enveloppe s'allongerait ainsi, suivant les génératrices, d'une quantité égale à :

$$\frac{T}{E}\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\mu}\right) = \frac{T}{E} \times \frac{1}{6}. \tag{5}$$

Dans la réalité, on peut admettre que les tirants reçoivent presqu'en totalité la pression exercée sur les fonds et que l'enveloppe n'en subit guère que la sixième partie ; les tirants sont donc seuls à s'allonger.

Si l'étude de la fatigue de l'enveloppe cylindrique est difficile, celle du travail des deux faces planes paraît impossible. Nous avons supposé que ces deux faces n'apportaient aucun appoint à la résistance transversale de la chaudière ; il y a une contradiction évidente entre cette hypothèse, et celle d'après laquelle l'enveloppe cylindrique subit une extension uniforme.

Sans la déformation des pinces extrêmes, l'extension uniforme de l'enveloppe suivant le diamètre, sur toute la longueur de la chaudière, imposerait aux fonds plans, même supposés pleins et sans découpure, une charge par millimètre carré notablement supérieure à celle de l'enveloppe. Dans l'hypothèse que nous avons prise, les fonds s'allongent comme l'enveloppe, d'une quantité égale à

$$\frac{T}{E};$$

mais ils s'allongent ainsi dans tous les sens, au lieu de s'allonger seulement dans un sens et de se raccourcir par suite dans l'autre, de la quantité

$$\frac{T}{E} \times \frac{1}{\mu}.$$

Dans ces conditions, la charge totale pour la matière des fonds T_1 est déterminée par l'équation

$$T_1 = T \frac{\mu}{\mu - 1} = \frac{d P}{2e} \frac{\mu}{\mu - 1} \tag{6}$$

en faisant $\mu = 3$, on a :

(7) $$T_1 = \frac{3}{2} T.$$

Les tôles de la façade, en raison de l'affaiblissement considérable produit par les trous des tubes et des foyers, seraient parfaitement incapables de résister à un pareil effort de tension. Or, sur les façades, ni les tôles, ni même les rivures, ne donnent jamais de signe de fatigue, même sur les chaudières à écharpes rendant indéformable le congé de raccordement de la façade et de l'enveloppe. La conclusion naturelle, à tirer de là, est que les fonds ne subissent qu'une faible extension. On peut facilement comprendre qu'il doit en être ainsi. En effet, la dilatation de la chaudière, dans le sens du diamètre, n'est nullement uniforme ; elle peut bien atteindre $0{,}001 \times d$ dans la partie centrale, mais elle est beaucoup moindre aux extrémités ; l'enveloppe, en se déformant, prend une forme de fuseau, comme l'indiquent les figures 99 et 100. La cause de cette variation dans l'extension suivant le diamètre, est dans la résistance même que les fonds opposent ; elle est probablement aussi dans la déformation, que les fonds subissent sous l'action des pressions parallèles aux génératrices. Les fonds en effet tendent à se capitonner autour de l'attache des tirants, ce qui doit diminuer leur diamètre. Il n'y aurait aucune impossibilité à ce que les enveloppes subissent, près des extrémités, une légère réduction de diamètre, au

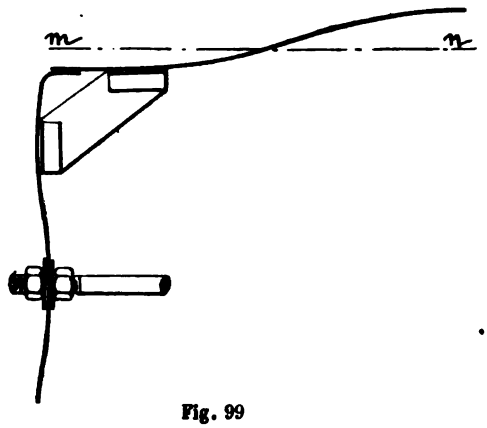


Fig. 99

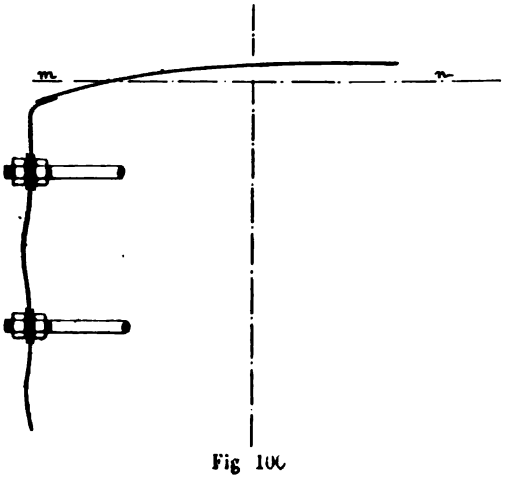


Fig 100

lieu d'une augmentation, comme l'indiquent les figures 99 et 100, où $m\,n$ représente la position initiale de la génératrice rectiligne, avant déformation. Dans ce dernier cas, la tension totale sur l'enveloppe

$$2\,e\,\Sigma\,\mathrm{T}\,dl = l d\mathrm{P},$$

serait la résultante de tensions variables T, dont la plus grande valeur serait de beaucoup supérieure à

$$\frac{d\,\mathrm{P}}{2\,e}.$$

Les considérations précédentes font voir l'intérêt de permettre une déformation au raccordement des fonds et de l'enveloppe cylindrique, pour ne pas obliger l'enveloppe à se courber, comme l'indique la figure 99, en présentant une inflexion.

Il n'y a pas d'intérêt à calculer, même à titre de simple comparaison d'une chaudière à l'autre, la charge des matériaux T, en supposant que les fonds travaillent avec l'enveloppe, comme un tout indéformable, et à poser par suite l'équation

$$(2le + 2de_1)\,\mathrm{T} = l d\,\mathrm{P}, \tag{8}$$

ainsi qu'on l'a fait quelquefois. Cette hypothèse s'écarte par trop de la réalité.

La pression n'est pas la seule cause de fatigue des enveloppes ; la différence des températures à la partie haute et à la partie basse en est une autre. L'eau la plus chaude tend naturellement à s'élever, tandis que le reste, relativement froid, s'amasse dans la région inférieure, et s'y refroidit encore, au contact des cendriers constamment traversés par un violent courant d'air froid. Le haut se dilate donc beaucoup plus que le bas, lorsqu'il n'existe pas, dans la chaudière, une circulation assez active pour brasser constamment toute la masse liquide. Soit $m\,a\,b\,n$ (fig. 101) la moitié d'une chaudière à droite du plan transversal $m\,n$, avant la chauffe. Les dilatations différentes dues aux températures en chaque point, si elles pouvaient se produire librement, donneraient aux diverses génératrices des longueurs telles, que le profil deviendrait $m\,c\,d\,e\,n$, par exemple. Les liaisons ne permettent pas de prendre cette forme. Chaude ou froide, la chaudière doit se terminer par un plan perpendiculaire aux génératrices ; elle s'arque donc suivant un contour tel que $m\,f\,g\,n$. On voit de suite que, dans cette déformation, la fibre centrale $h\,i$, conservant à peu près sa longueur en $h\,k$, la génératrice supérieure $m\,f$ deviendra plus longue que $m\,c$, et la génératrice inférieure $n\,g$ plus courte que $n\,e$.

Les hauts travaillent donc par extension, et les bas par compression. Sur le *Surcouf*, où la différence des températures a atteint 120 degrés, on a pu calculer que la contraction de la génératrice inférieure correspondait à une charge de 20 kilogrammes par millimètre carré, sur les

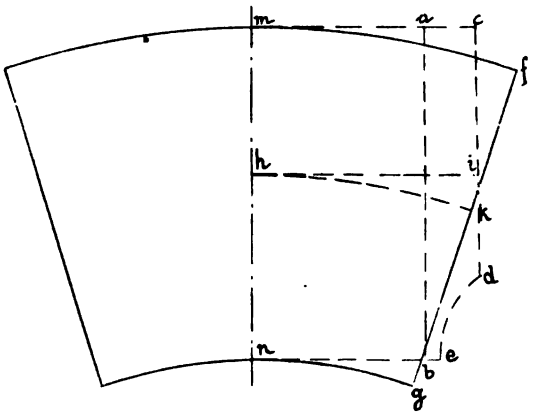


Fig. 101

tôles en dehors des joints, indépendamment des autres efforts. On voit combien il est nécessaire, surtout sur les chaudières à tubes directs comme celles du *Surcouf*, d'opérer un brassage énergique de l'eau pour éviter les écarts de température.

91. — *Fatigues permanentes et altération du métal.* — En étudiant les efforts auxquels se trouvent soumis les foyers, les boites à feu, les enveloppes, soit par suite de l'inégalité des échauffements et des dilatations, soit par l'effet de la pression de la vapeur, nous avons implicitement admis que les matériaux partaient toujours de l'état initial correspondant à leur mise en place ; en d'autres termes nous avons supposé que, dans les chauffes antérieures, la limite d'élasticité du métal n'avait jamais été dépassée, ni ses propriétés physiques altérées. En réalité, les choses se passent tout différemment.

Quand on chauffe inégalement les différentes parties d'une pièce de métal qui peut librement changer de forme, on produit des déformations permanentes. Supposons par exemple (fig. 102), pour prendre le cas le plus simple, que, sur une bande de tôle *abcd*, on chauffe fortement la portion inférieure *efcd*, tandis que *abef* reste froid. La dilatation qui devrait faire passer *df* en *d'f'* étant contrariée par la résistance de la partie froide, la bande chaude est comprimée au delà de la limite d'élasticité ; en même temps, la bande supérieure froide est allongée au delà de cette même limite et, de plus, ne subit aucun effet de recuit.

Après le refroidissement, ab sera plus long que cd, et la pièce aura une forme $a_1 b_1 c_1 d_1$. Les chaudronniers habiles connaissent très bien ces effets de l'échauffement partiel, et ils les utilisent quelquefois pour obtenir, sans aucun martelage, des pièces de tôlerie de forme compliquée.

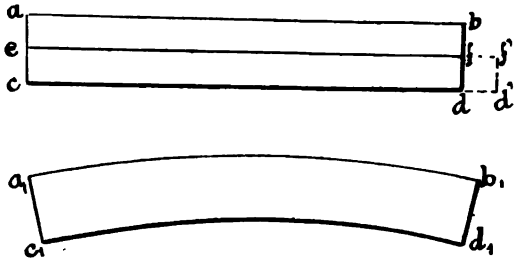


Fig. 102

Ces phénomènes ont été autrefois étudiés par M. Yarrow. M. Garnier ingénieur de la marine, en a repris l'étude à Indret, d'une façon plus complète, en opérant sur des bandes de fer et d'acier qui butaient à leurs extrémités, contre de robustes étriers en fonte. M. Garnier a expérimenté ensuite le cas, se rapprochant davantage de la pratique, où les bandes sont encastrées à leurs extrémités au moyen d'un boulonnage solide, et tenues en divers points de leur partie centrale par un capitonnage analogue à celui des boites à feu (fig. 103). Enfin, il a poursuivi

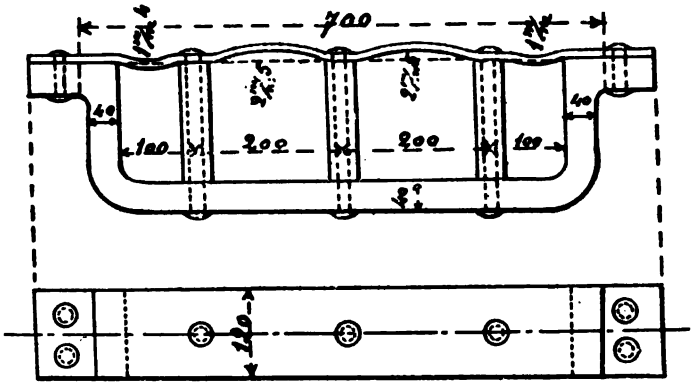


Fig. 103

ses expériences sur des disques en tôle de fer, d'acier, et de laiton, subissant des chaudes locales. Les résultats obtenus concordent bien avec l'étude théorique des phénomènes ; ils ont permis de vérifier la production de déformations permanentes sur les pièces déformables et, en particulier, les soulèvements partiels ou boursouflures, qui se produisent à la chaleur, sur les tôles capables de se dédoubler, et qui sont connus sous le nom de *moines*.

La plupart des pièces des chaudières sont assemblées entre elles d'une manière qui rend leurs formes invariables, et alors, au lieu de déformations permanentes, ce sont des tensions moléculaires permanentes qui se produisent ; ce cas offre quelqu'analogie avec celui des grosses pièces d'acier forgé, si exposées aux tapures quand elles sont très carburées. L'existence de ces tensions se manifeste nettement, lors de la démolition des chaudières ; il arrive souvent, en effet, quand on fait sauter les rivets d'une couture, que les derniers rivets se cisaillent d'eux-mêmes, ou tout au moins que, aussitôt les rivets enlevés, les tôles glissent brusquement l'une sur l'autre, de sorte que les trous ne sont plus en regard. Ces tensions intérieures ne sont probablement pas étrangères aux accidents auxquels les chaudières sont exposées.

D'autre part, l'expérience semble indiquer que, par une série d'échauffements et de refroidissements répétés, le fer et l'acier s'altèrent, changent de texture moléculaire, et deviennent très fragiles. On explique ainsi comment les chaudières en cours de service se fissurent assez souvent dans la couture fixant les foyers et les boites à feu, point où la fatigue due à la pression est faible, mais où l'échauffement est violent. C'est là une des nombreuses altérations du métal, désignées sous une seule rubrique par les chaudronniers, quand ils disent que *le fer est brûlé*. Il est à remarquer d'ailleurs, que les parties exposées à de grandes variations de température sont, en même temps, sujettes aux répartitions inégales de la température produisant des tensions ou des compressions intérieures, qui dépassent la limite d'élasticité. Il est donc possible que l'effet des changements de température soit dû à des causes purement mécaniques.

CHAPITRE IX

CHAUDIÈRES LOCOMOTIVES

§ 3. — Application dans la marine des chaudières locomotives.

92. — *Motifs d'adoption des chaudières locomotives.* — Nous nous sommes spécialement étendus, dans ce qui précède, sur les chaudières cylindriques, qui sont encore, à l'heure actuelle, le modèle le plus répandu sur les navires de guerre en service, et le modèle adopté, à peu d'exceptions près, sur les bâtiments de commerce en service et en construction. Il existe un autre modèle à tubes directs, dit *type locomotive*, notablement différent des chaudières cylindriques.

Deux motifs ont conduit à l'introduction dans la marine des chaudières locomotives, savoir :

1° *La question de poids.* — En effet, les chaudières cylindriques sont très lourdes, à cause du grand volume d'eau inutile qui entoure leurs foyers, spécialement les foyers des chaudières à flamme directe. Sur les chaudières des locomotives, au contraire, le foyer n'a autour de lui que les lames d'eau juste nécessaires pour l'utilisation de la chaleur. Il résulte de là qu'aux pressions de 9 kilogrammes, pour lesquelles elles ont été faites tout d'abord, les chaudières type locomotive ne pèsent guère que 8/11 du poids d'une chaudière cylindrique à tubes directs, fonctionnant à la même pression.

2° *L'aptitude à subir des tirages forcés très intenses.* — Le tirage forcé a, de tous temps, été employé sur les locomotives ; il était donc naturel, en introduisant à bord le tirage forcé, d'introduire en même temps les chaudières éprouvées en service avec ce tirage.

Les raisons qui précèdent ont fait songer souvent à l'application étendue des chaudières de locomotives à la marine; mais la pratique

Torpilleur n° 60

Chaudière locomotive (Type E)

Coupe suivant CD

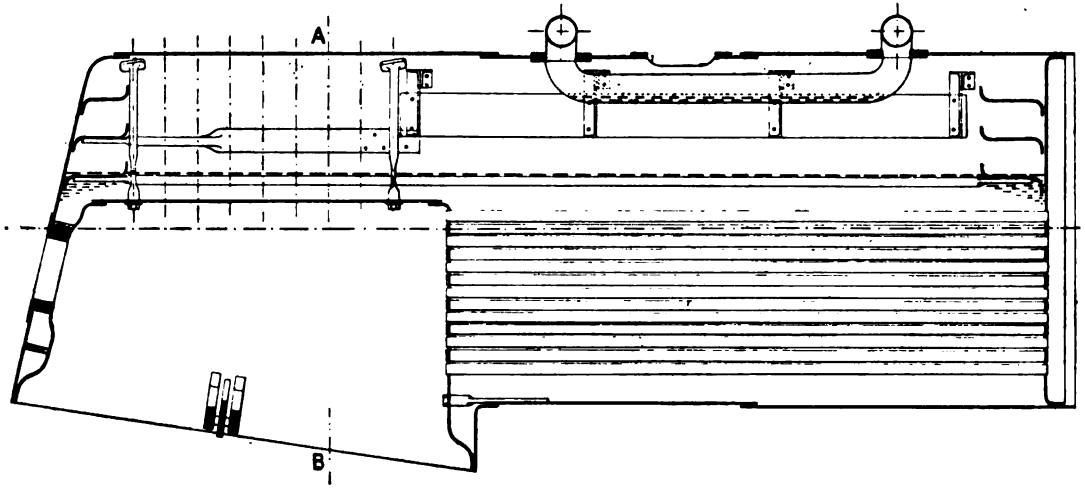


Fig. 104

Coupe suivant AB

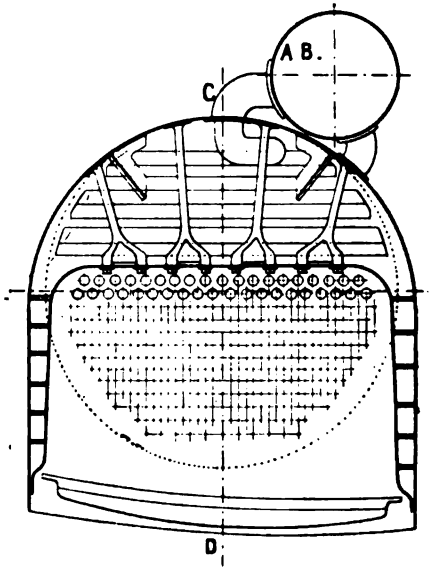


Fig. 104 *bis*

ayant été loin de réaliser les espérances fondées sur elles, leur emploi est toujours resté très limité. Les chaudières type locomotive n'ont servi que sur les torpilleurs et les avisos-torpilleurs, où les chaudières tubuleuses ont ensuite commencé à se substituer à elles, avant de venir faire concurrence aux chaudières cylindriques sur les grands navires.

93. — *Description et construction.* — L'application des chaudières type locomotive étant peu étendue et probablement temporaire, il suffit de dire quelques mots à leur sujet, en renvoyant d'ailleurs aux ouvrages concernant le matériel des chemins de fer pour les détails de leur construction.

Les chaudières des locomotives se distinguent par la disposition du foyer, formé de trois faces planes sur les côtés et le ciel; de plus le foyer est entièrement ouvert à la partie inférieure, où l'air s'engouffre en vertu de la vitesse du train, autant que du tirage. Les tôles du foyer, y compris la plaque à tubes, sont actuellement en acier; la plaque à tubes était autrefois en cuivre rouge, écroui par un battage à la main, qui réduisait l'épaisseur de la tôle de 2 millimètres environ.

Le foyer est haut, bien dégagé et sert de chambre de combustion. Il n'y a pas de boîte à feu.

L'enveloppe extérieure de la chaudière se compose, autour du foyer, de faces latérales planes entretoisées avec celles du foyer, et d'un ciel demi-cylindrique auquel le ciel du foyer est suspendu par des tirants; pour tout le reste, elle est constituée par un cylindre formant le prolongement du dessus du foyer.

Les tubes sont très longs et de faible diamètre.

Les chaudières marines, type locomotive, diffèrent des véritables chaudières de locomotives par deux points principaux.

Le défaut d'espace disponible en hauteur oblige à placer la grille beaucoup plus haut que sur les locomotives, beaucoup plus près, par conséquent, de l'entrée des tubes; l'espace pour la combustion, pour le brassage des gaz et leur répartition, est ainsi très réduit.

Le défaut d'espace disponible en longueur oblige à faire les tubes beaucoup plus courts et par suite plus raides, ce qui est une cause de fatigue pour les emmanchements dans la plaque de tête.

Les chaudières locomotives exigent des soins minutieux, faute desquels elles fonctionnent mal; les tubes ont fui fréquemment, à des tirages forcés inférieurs à ceux auxquels on marche sur les locomotives. Les fentes du foyer et les fentes au joint du foyer et de la plaque de tête, la corrosion dans le bas des lames d'eau, exigent des réparations fréquentes. Les appareils sont de courte durée : cinq ans (torpilleur n° 16

Chisima (Aviso-Torpilleur japonais)

Chaudière type locomotive, modèle Tembrinck

Coupe suivant AB

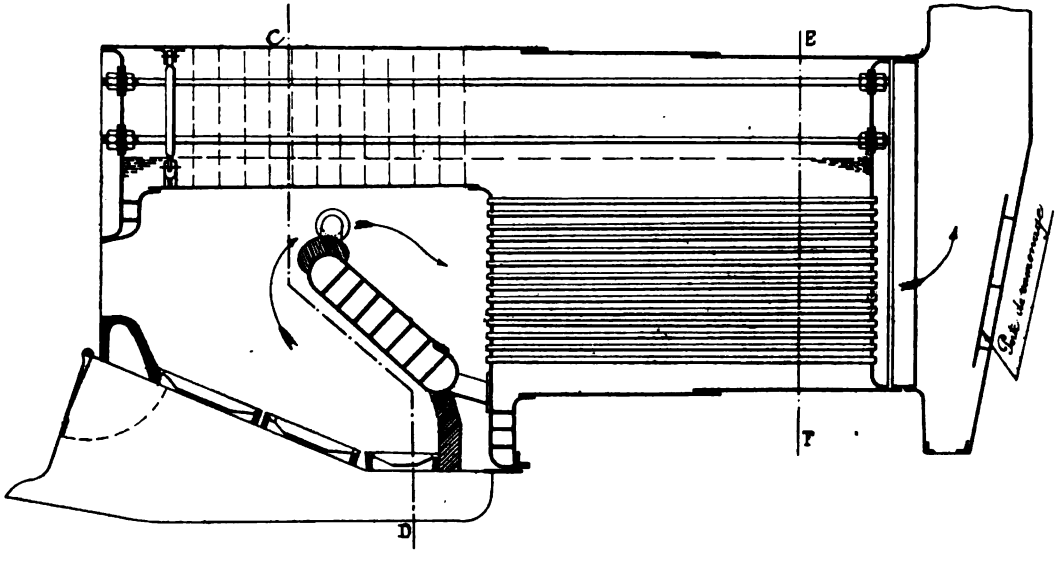


Fig. 105

Demi-coupe suivant CD Demi-coupe suivant EF

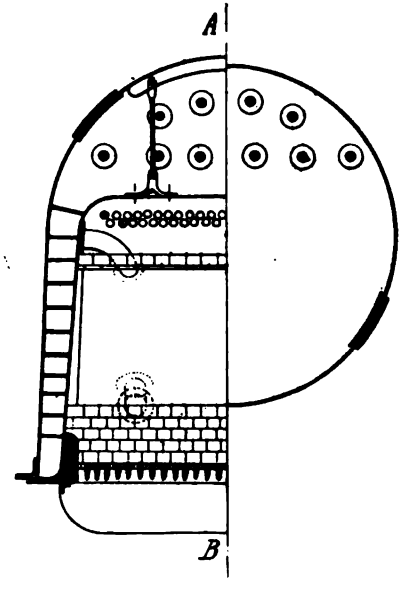


Fig. 105 *bis*

Croiseur-Torpilleur, type Faucon

Chaudière type locomotive modifié

Echelle de 0m,03 par mètre.

Coupe suivant EF

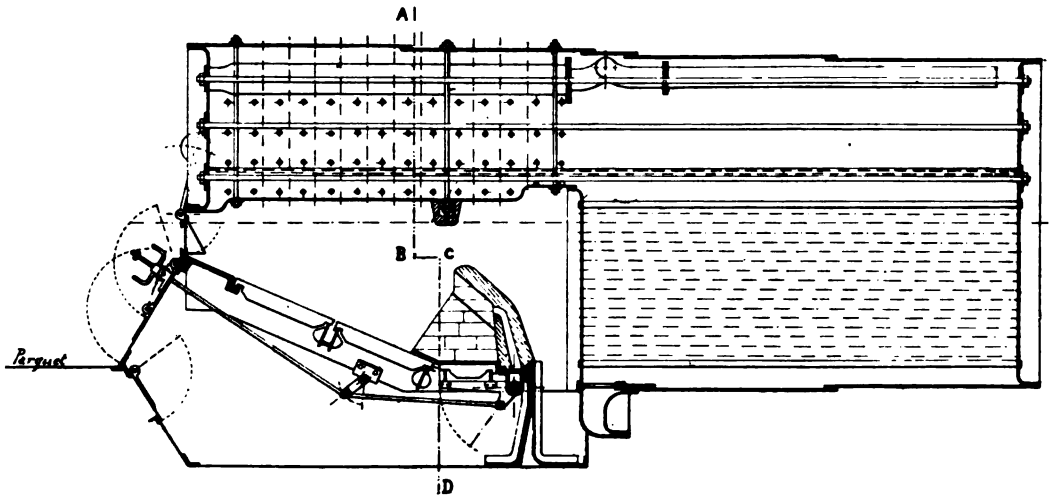


Fig . 106

Mi-vue Mi-coupe suivant ABCD

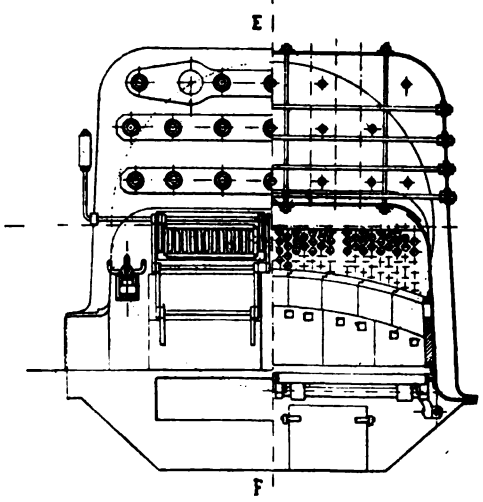


Fig. 106 *bis*

et beaucoup d'autres), par exception neuf ans sur le torpilleur 21, et douze ans avec 5.000 heures de chauffe sur le torpilleur 37. On a indiqué bien des causes à leurs nombreuses avaries. M. Marshall, par exemple, a accusé le défaut de circulation près de la plaque de tête, et proposé d'établir sous le foyer une lame d'eau, où l'eau resterait probablement froide et stagnante; il n'a du reste pas appliqué le remède qu'il indiquait.

Les figures 105 et 106 représentent deux dispositions adoptées, en vue d'empêcher l'arrivée trop directe des gaz chauds aux tubes ; dans le premier cas, l'écran protecteur est formé par une lame d'eau, dans le second, c'est une maçonnerie prolongeant l'autel.

En faisant une part aux défectuosités de principe et surtout à la position de la grille, la grande différence, entre la tenue des chaudières à bord et sur les locomotives, dépend surtout des différences dans le fonctionnement. Sur les locomotives, les chaudières ne font de service que pendant cinq ou six heures consécutives, après quoi elles sont visitées et nettoyées; elles ne connaissent ni les changements de quarts, ni les décrassages en plein feu, ni les ramonages en marche, bref aucune des circonstances qui sont fatales, même aux chaudières cylindriques d'une construction plus robuste et plus homogène.

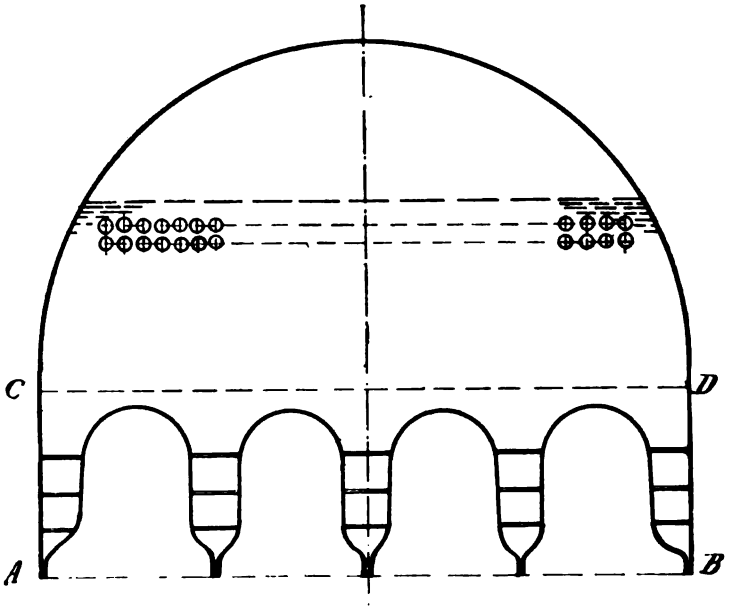


Fig. 107

Si, sur les locomotives, on n'observe pas les mêmes fatigues qu'à bord aux joints des tubes sur la plaque de tête, la raison en est surtout que

la pression d'air dans la boite à feu est à peu près la même que dans la chambre de chauffe.

La pression dans le cendrier, due à la marche du train, contre-balance en effet la résistance à travers la grille; le tirage forcé dans la cheminée n'a que la résistance des tubes à vaincre. L'ouverture de la porte du foyer ne donne donc pas lieu aux rentrées violentes d'air froid, qui sont si funestes aux plaques de tête des chaudières tubulaires marines.

A la charge des chaudières marines type locomotive, il faut ajouter que le ciel plat de leur foyer émerge sur une beaucoup plus grande surface qu'un ciel de foyer cylindrique, en cas d'arrêt dans l'alimentation. De là des coups de feu, des arrachements de tirants et souvent de graves accidents de personnes.

Il est à remarquer que l'économie de poids réalisée par rapport aux chaudières cylindriques à tubes directs, en adoptant le foyer des locomotives, aurait pu être obtenue sur les chaudières à retour de flamme, en les constituant simplement d'un demi-cylindre terminé à la partie inrieure par une rangée de foyers entretoisés. L'invariabilité de forme aurait été facilement assurée par quelques tirants placés à la partie basse.

Cette disposition, qui n'aurait exposé les ciels de foyers à aucun danger, a été préconisée par M. Joessel, à l'époque où les pressions étaient de 4 kilogrammes; mais elle n'a jamais été exécutée.

CHAPITRE X

RENSEIGNEMENTS GÉNÉRAUX

§ 4.

94. — *Durée des chaudières type marin.* — Après avoir ainsi tracé le tableau des causes de fatigue, de dislocation et de corrosion auxquelles sont soumises les chaudières, et avoir énuméré les nombreuses précautions à prendre, il est temps de dire que les chaudières type marin, bien construites et traitées avec ménagement, sont des appareils sûrs et de bonne durée. Les actions chimiques, auxquelles toutes les chaudières sont exposées, leur sont en général plus nuisibles que les efforts purement mécaniques. Les avaries les plus fréquentes sont des corrosions à la suite de fuites, dans la plaque de tête, au joint des foyers et au joint des tubes. Les enveloppes présentent quelquefois une usure rapide près de l'arrivée de l'alimentation et surtout vers la hauteur du niveau de l'eau. Autrefois, les foyers en fer se dédoublaient souvent et produisaient des moines ; le danger a disparu par suite de l'emploi de l'acier.

On rencontre assez souvent des piqûres locales, souvent hémisphériques, à l'endroit où la vapeur se produit avec le plus d'abondance ; il semblerait que les bulles s'y creusent une sorte de logement ; mais c'est surtout au dégagement des bulles d'air qu'est due cette sorte d'usure. Le dégagement des bulles d'air, une fois commencé sur un point, s'y reproduit toujours et y donne rapidement une piqûre pustuleuse. La corrosion est rapide et paraît produire un dégagement d'hydrogène ; elle est favorisée par la présence de l'acide carbonique ; elle est surtout à craindre sur les tôles non homogènes et dans les soudures ; elle paraît très faible ou nulle sur l'acier, surtout s'il contient du nickel ou du chrôme ; elle est arrêtée par la présence dans l'eau des alcalis et du borax. En somme, quand ils n'ont jamais subi de coups de feu, les foyers atteignent la durée de l'enveloppe.

Les tubes se piquent souvent près de la soudure quand ils sont en fer ou en acier; quand ils sont en laiton, ils peuvent user deux chaudières.

La réduction d'épaisseur des tôles, produite par l'usure régulière, est extrêmement lente. Beaucoup de chaudières de paquebots sont en très bon état après dix ans de service passés sans réparation sérieuse; débarquées par mesure de prudence, après douze ans et plus, sur les grandes lignes à passagers, elles ont encore quelquefois pu servir cinq ou six ans sur les cargos. On cite des chaudières qui ont fait vingt ans à bord d'un navire; telles sont celles du *Notre-Dame-du-Salut* affrété pour Madagascar et celles d'un paquebot de la C^ie^ *White Star* qui, mises à bord en 1871, étaient encore en bon état en 1895.

Dans la marine de guerre, les intermittences de service, les longues périodes d'arrêt en se tenant prêt à marcher, les mutations dans le personnel de la machine, créent des conditions défavorables. On ne peut pas exiger plus de huit à dix ans d'une chaudière, en comptant sur une réparation dans l'intervalle; du moins, on a la sécurité assurée pour toute la durée d'une campagne lointaine, quand on part avec les chaudières en bon état, et l'on peut en général doubler la campagne.

Nous parlons toujours des chaudières à retour de flamme, non des chaudières à tubes directs, qui offrent moins de garanties; surtout nous ne parlons pas des chaudières type locomotive, avec lesquelles, en pratique, on ne pourrait pas compter sur un service de trois ans sans réparation, ni sur une durée totale de plus de six ans.

95. — *Poids des chaudières tubulaires.* — On comprend dans le poids des chaudières, sur le devis général des poids d'un navire, tout ce qui sert à leur fonctionnement, au traitement de l'eau, au refoulement de l'air dans le tirage forcé, et, d'une manière générale, tout ce que renferme la chambre des chaudières, en y ajoutant l'outillage et les rechanges en magasin. Dans la nomenclature des diverses parties composant ce total, on a uniquement cherché à faire un inventaire complet, sans aucun oubli, ce qui est effet la seule condition à remplir dans le devis de poids dont il s'agit.

Une étude, visant à la comparaison des divers modèles entre eux, et permettant de prévoir les changements de poids qui doivent correspondre à un changement de régime, exige une classification plus rationnelle; il convient, en effet, de faire, les distinctions suivantes :

I. — *Éléments qui dépendent de la pression de timbre* Π, et dont le poids par mètre carré de grilles doit être rapporté à cette pression Π.

1° Chaudières proprement dites, sans les barreaux de grilles ni la maçonnerie.

2°. Soupapes d'arrêt, de sûreté, de décharge, surchauffeurs de vapeur, détendeurs, épurateurs.

3°. Tuyautage des chaufferies.

II. — *Éléments qui dépendent de l'intensité de la chauffe*, c'est-à-dire qui dépendent de la quantité de charbon K brûlée par mètre carré de grilles, ou de la quantité d'eau vaporisée par mètre carré de grilles; le total de ces poids, par mètre carré de grilles, doit être rapporté à la combustion K.

4°. Pompes alimentaires.

5°. Bâches des pompes alimentaires et caisses de réserve.

6°. Réchauffeurs d'eau d'alimentation.

7°. Filtres à éponges, appareils divers de purification de l'eau, caisses à eau de chaux.

8°. Bouilleurs pour réparation des pertes.

9°. Eau des bâches, des caisses d'alimentation, des caisses de réserve et de tous les appareils précédents.

10°. Ventilateurs ou machines soufflantes pour le tirage forcé.

III. — *Éléments indépendants à la fois de* Π *et de K*, qui doivent être simplement rapportés à la surface de grilles G.

11°. Eau des chaudières.

12°. Grilles et autels (maçonnerie comprise).

13°. Cheminées, boites à fumée et conduits de fumée.

14°. Feutrage et enveloppes isolantes quelconques.

15°. Outillage et rechanges.

16°. Parquets et échelles des chaufferies.

Logiquement, le dernier de ces poids devrait appartenir à la coque.

On trouve rarement, dans les documents relatifs aux appareils, les moyens de répartir le poids total entre les trois groupes précédents P_1 poids variant avec pression Π, P_2 poids variant avec K, et P_3 poids indépendants ou à peu près de Π et de K. Le plus souvent on n'a que le total $P = P_1 + P_2 + P_3$, avec une décomposition sans autre valeur que celle d'une simple nomenclature.

Quoi qu'il en soit, une chaudière étant caractérisée, au point de vue du poids, par le rapport

$$\frac{P}{G} = A, \tag{1}$$

poids par mètre carré de grilles, il faut, pour juger sa valeur, mettre en regard de ce poids, à défaut du poids d'eau vaporisée par mètre

carré de grilles, que l'on ne connaît presque jamais, la puissance réalisée par mètre carré de grilles dans la machine

$$\frac{F}{G} = B. \tag{2}$$

La puissance B, par mètre carré de grilles, est un élément très complexe; elle dépend à la fois, de l'intensité de combustion K et des deux rendements, de la chaudière en quantité de vapeur par kilogramme de charbon, de la machine en kilogrammètres par kilogramme de vapeur. En se reportant à la seule donnée habituellement relevée pour tenir compte des deux rendements, savoir la quantité de charbon C brulée par cheval-heure, on a:

$$C = \frac{K}{B}. \tag{3}$$

On conclut de là, pour le poids d'une chaudière D, par cheval :

$$D = \frac{P}{F} = \frac{P}{G} \times \frac{G}{F} = \frac{A}{B} = \frac{AC}{K}\ ; \tag{4}$$

ce poids est donc proportionnel au poids par mètre carré de grilles et à la consommation de charbon par cheval, et inversement proportionnel au poids de charbon brûlé par mètre carré de grilles.

On sait que la consommation par cheval C diminue rapidement quand la pression s'élève; cela tient au rendement de la machine, qui s'améliore avec les longues détentes permises par les hautes pressions, mais non pas à l'effet direct de la pression, comme il est facile de s'en rendre compte de la manière suivante :

La chaudière peut vaporiser pratiquement les mêmes quantités d'eau à toutes les pressions, surtout quand il s'agit de pressions élevées, ainsi que l'indique le tableau de la page 61, donnant les quantités de chaleur Q contenues dans 1 kilogramme de vapeur à des pressions variant de 2 en 2 kilogrammes.

D'autre part, le volume d'un kilogramme de vapeur V est à peu près inversement proportionnel à la pression Π, aux pressions élevées des appareils actuels; sa valeur peut se calculer, en mètres cubes, d'après l'équation :

$$V\,\Pi = 2.$$

Les deux quantités Q et V Π restant toutes deux, sensiblement constantes, ni le rendement de la chaudière, ni celui de la machine, ne

changeraient quand Π viendrait à varier; par conséquent C resterait constant, si la détente ne changeait pas.

Quand la détente varie, on ne peut comparer ensemble, sous le rapport de leur poids par cheval, que les chaudières fournissant la vapeur à des machines semblables. Le poids A, par mètre carré de grilles, exprime alors la légèreté des chaudières à égalité de combustion K de charbon; leur poids D par cheval, exprime leur aptitude à supporter la chauffe d'intensité K. On a, entre ces deux poids, le rapport :

$$\frac{A}{D} = \frac{K}{C}$$

dans lequel C est supposé ici constant.

En groupant des appareils analogues entre eux, et en classant les groupes d'après le nombre des détentes successives dans la machine, nous formons, pour les chaudières tubulaires les plus récentes, les tableaux suivants.

I. — CHAUDIÈRES A RETOUR DE FLAMME

NOMS des bâtiments	Poids total P	Surface de grilles G	Puissance totale maximum réalisée F	Combustion par mètre carré de grilles K	Puissance par mètre carré de grilles B	Consommation par cheval C	POIDS par mètre carré de grilles A	POIDS par cheval D	Rapport de la surface de chauffe à celle des grilles S/G	Pression Π	Coefficient d'expansion dans la machine Δ
1° — MACHINES A DOUBLE DÉTENTE ET CHAUDIÈRES A SIMPLE FAÇADE											
Sfax. . . .	501354 k	50ms,00	6435 ch.	116k,5	128ch,70	0k,905	10023k,1	77k,91	34,44	6k,00	4,88
Manche. . .	64847	8 ,14	817 »	79 ,8	100 ,4	0,785	7966 ,4	79 ,34	27,39	7 ,00	5,64
Amiral-Baudin.	631086	70 ,92	8448 »	109 ,0	119 ,05	0,916	8898 ,5	74 ,74	22,99	4 ,25	3,32
2° — MACHINES A DOUBLE DÉTENTE ET CHAUDIÈRES A DOUBLE FAÇADE											
Cécille . . .	671850	79 ,20	10892 »	131 ,6	137 , 5	0 ,947	8482 ,9	61 ,68	31,86	6 ,25	5,06
3° — MACHINES A TRIPLE DÉTENTE, CHAUDIÈRES A SIMPLE FAÇADE											
Isly	551471	54 ,16	8154 »	122 ,8	150 ,55	0 ,816	10182 ,2	67 ,63	39,65	9 ,50	7,77
Bretagne. . .	1043087	75 ,19	7075 »	89 ,0	94 , 09	0 ,950	13872 ,7	147 ,48	27,66	10 ,00	9,05
4° — MACHINES A TRIPLE DÉTENTE, CHAUDIÈRES A DOUBLE FAÇADE											
D'Entrecasteaux	784200	90 ,25	13500 »	150 ,0	149 ,50	0 ,988	8135 ,1	54 ,38	30,59	10 ,50	7,61
5° — MACHINES A QUADRUPLE DÉTENTE, CHAUDIÈRES A SIMPLE FAÇADE											
Gascogne . .	1071877	78 ,19	7243 »	88 ,0	92 ,63	0 ,950	13872 ,7	147 ,98	27,30	11 ,00	9,07

II. — CHAUDIÈRES A TUBES DIRECTS

NOMS des bâtiments	Poids total P	Surface de grilles G	Puissance totale maximum réalisée F	Combustion par mètre carré de grilles K	Puissance par mètre carré de grilles B	Consommation par cheval C	POIDS par mètre carré de grilles A	POIDS par cheval D	Rapport de la surface de chauffe à celle des grilles G/S	Pression H	Coefficient d'expansion dans la machine Δ
1° — MACHINES A DOUBLE DÉTENTE											
Hoche . . .	650548,k	52m.q.,03	10590 ch.	241k,0	203ch.,53	1k,166	12503k,3	61k,43	40,94	6k,200	4,64
Matsou-Sima. .	395787	36 ,00	6836 »	210 ,0	190 ,72	1 ,095	10994 ,0	57 ,64	39,41	12 ,000	5,77
2° — MACHINES A TRIPLE DÉTENTE											
Dupuy-de-Lôme	792625	56 ,59	13156 »	230 ,0	232 ,48	0 ,946	14 006 ,4	60 ,24	49,44	11 ,250	mach. latér. 8,900 mach. centr. 9,217
Suchet . . .	571728	39 ,92	9504 »	223 ,0	238 ,08	0 ,945	14322 ,6	60 ,16	48,16	11 ,200	7,831
Linois . . .	346537	36 ,12	6727 »	175 ,0	186 ,24	0 ,937	9594 ,0	51 ,51	37,89	11 ,250	7,59

III. — CHAUDIÈRES TYPE LOCOMOTIVE

MACHINES A TRIPLE DÉTENTE

Torpilleurs de 35 mètres. .	13101 k.	2m.q.,30	525 ch.	271k,42	228ch.,26	1k,188	5696k,1	24k,95	45,18	9k,33	4,67
Torpilleurs 126 à 129. . .	18339	2 ,82	1029 »	286 ,27	364 ,88	0 ,784	6503 ,2	17 ,82	46,88	10 ,00	3,80
Bombe . . .	49856	7 ,20	1970 »	287 ,33	273 ,65	1 ,050	6924 ,4	25 ,30	46,83	8 ,50	3,55
Achéron. . .	86038	8 ,00	1690 »	210 ,19	211 ,25	0 ,995	10754 ,7	50 ,91	42,00	6 ,00	5,96

Dans ce tableau, le poids total P est généralement tiré des devis d'armement, en attribuant aux chaudières 40 % de l'outillage et des rechanges, qui sont inscrits au devis pour le total applicable aux machines et aux chaudières; l'erreur qui peut avoir été commise par là, dans certains cas, n'a pas d'influence sensible sur les valeurs de A et de D.

La puissance F est la puissance maximum, obtenue au tirage forcé dont la colonne K exprime suffisamment l'intensité. Comme dans beaucoup de cas, des appareils semblables, ou du moins capables de résister au même tirage, ont été expérimentés à des tirages très différents, en rapport avec la puissance de consommation de vapeur des machines, la colonne A fournit des termes de comparaison, d'un modèle à l'autre, plus intéressants que les chiffres de la colonne D.

Voici maintenant, les tableaux relatifs au poids des chaudières, tel qu'il se répartit entre les éléments qui dépendent de la pression, de l'intensité de la chauffe, ou simplement de la surface de grilles.

CHAUDIÈRES A SIMPLE FAÇADE, A RETOUR DE FLAMME

			NAVIRES DE GUERRE				PAQUEBOTS	
			Sfax	Manche	Amiral-Baudin	Isly	Bretagne	Gascogne
Indications générales	Timbre des chaudières	II	6k,200	7k,000	4k,250	9k,500	10k,000	11k,000
	Surface de grilles totale	G	50m²,00	8m²,14	70m²,92	54m²,16	75m²,19	78m²,19
	Surface de chauffe totale en m²	S	1721,82	122,98	1630,74	2147,50	2080,00	2135,00
	Puissance en chevaux réalisée aux essais	F	6435ch.x.	817ch 25	8443ch.x.	8154ch.x.	7075ch.x.	7243ch.x
	Quantité de charbon brûlé par mètre carré de grilles	K	116k,50	79k,85	109k,00	122k,80	89k,00	88k,00
	Quantité de charbon brûlé par cheval et par heure aux essais	C	0k,905	0k,7846	0k,916	0k,816	0k,950	0k,950
I Eléments qui dépendent de la pression de timbre II, et dont le poids par m² de grilles doit être rapporté à cette pression II	Chaudières principales, sans les barreaux de grille ni la maçonnerie		249312k	30416k	292200k	279385k	498456k	417984k
	Soupapes d'arrêt, de sûreté, de décharge, détendeurs, épurateurs, surchauffeurs		7200	1200	9960	11968	6588	9298
	Tuyautage et robinetterie des chaufferies		10880	1200	10000	15976	26633	32344
	Total des poids II	P_1	267392k	32816k	312160k	307359k	531677k	559626k
	Rapport	$\frac{P_1}{G}$	5347,8	4031,4	4401,6	5674,9	7071,1	7157,2
	Rapport	$\frac{P_1}{CII}$	862,55	575,92	1035,66	597,73	707,11	650,66
II Eléments qui dépendent de l'intensité de la chauffe, c'est-à-dire de la quantité de charbon K brûlé par m² de grilles ou de la quantité d'eau vaporisée par m² de grilles; le total de ces poids, par m² de grilles, doit être rapporté à la combustion K.	Pompes alimentaires		2900	659	3700	3689	2100	2700
	Bâches des pompes alimentaires et caisses de réserve		5000	350	6640	4246	»	»
	Réchauffeurs d'eau d'alimentation		»	»	»	»	»	»
	Filtres à éponges, appareils de purification de l'eau, caisses à eau de chaux		»	»	»	»	»	»
	Bouilleurs pour réparation des pertes		»	»	»	»	6228	6228k
	Eau des bâches, des caisses d'alimentation et des appareils précédents		5340	150	3120	17040	8000	8000
	Ventilateurs ou machines soufflantes pour le tirage forcé		11052	»	15240	3406	»	»
	Appareils de réchauffage d'air		»	»	»	»	»	»
	Total des poids	P_2	24292k	1159k	28700k	28381k	16428k	16928k
	Rapport	$\frac{P_2}{G}$	485k,84	142k,38	404k,68	524k,02	217k,15	216k,49
	Rapport	$\frac{P_2}{GK}$	4,17	1,78	3,71	4,27	2,44	2,46
III Eléments indépendants à la fois de II et de K, qui doivent être simplement rapportés à la surface de grilles G.	Eau des chaudières		120540k	17200k	173730k	134256k	282000k	282000k
	Grilles, maçonnerie et autels		24810	3962	38496	23625	65119	59939
	Cheminées, conduits de fumée, boîtes à fumée		31200	3450	40300	30776	103270	102485
	Feutrage et enveloppes isolantes quelconques		11250	1460	13500	6752	9590	9681
	Outillage et rechanges		15870	2900	16200	8742	25000	25000
	Parquets et échelles des chaufferies		6000	1900	8000	11580	10103	16218
	Total des poids III	P_3	209670k	30872k	290226k	215731k	495082k	495323k
	Rapport	$\frac{P_3}{G}$	4193,4	3792,6	4092,3	3983,2	6584,4	6334,8
Résumé	Poids total	$P_1+P_2+P_3$	501354k	64847k	631086k	551471k	1043087	1071877
	Poids total par m² de grilles, A	$\frac{P_1+P_2+P_3}{G}$	10023k1	7966k,4	8898k,5	10182k2	13872k7	13872k7
	Puissance en chevaux réalisée aux essais par m² de grilles	$B=\frac{F}{G}$	128ch 70	100ch 40	119ch 05	150ch 55	94ch.x.,09	92ch.x.,63
	Poids total par cheval	$D=\frac{P_1+P_2+P_3}{F}=\frac{AC}{K}$	77k,91	79k,34	74k,74	67k,63	147k,43	147k,98

CHAUDIÈRES A DOUBLE FAÇADE

			Cécille	Capitaine-Prat	D'Entrecasteaux
Indications générales	Timbre des chaudières	II	6k,25	10k,00	10k,50
	Surface de grilles totale	G	79m².20	64m².00	90m²,25
	Surface de chauffe totale	S	2484m².	2112m²	2761m²
	Puissance en chevaux réalisée aux essais	F	10892 chx.	12150 chx.	13500 chx.
	Quantité de charbon brûlé par mètre carré de grilles	K	131k,6	»	150k,00
	Quantité de charbon brûlé par cheval et par heure aux essais	C	0 ,947	»	0 ,988
I. Éléments qui dépendent de la pression de timbre II, et dont le poids par m² de grilles doit être rapporté à cette pression II.	Chaudières principales, sans les barreaux de grille ni la maçonnerie		263790k.	280329k.	319000k.
	Soupapes d'arrêt, de sûreté, de décharge, détendeurs, épurateurs, surchauffeurs		10000	9600	12500
	Tuyautage et robinetterie des chaufferies		22000	35000	36000
	Total des poids I	P_1	325790k	324929k	367500k
	Rapport	$\frac{P_1}{G}$	4113k,5	5077k,0	4072k,0
	Rapport	$\frac{P_1}{GII}$	658 ,16	507 ,70	387 ,1
II. Éléments qui dépendent de l'intensité de la chauffe, c'est-à-dire de la quantité de charbon K brûlé par m² de grilles ou de la quantité d'eau vaporisée par m² de grilles; le total de ces poids, par m² de grilles, doit être rapporté à la combustion K.	Pompes alimentaires		4450k.	4398k.	5800k.
	Bâches des pompes alimentaires et caisses de réserve		5600	4350	5900
	Réchauffeurs d'eau d'alimentation		»	»	»
	Filtres à éponges, appareils de purification de l'eau, caisses à eau de chaux		»	2370	3100
	Bouilleurs pour réparation des pertes		»	5475	6200
	Eau des bâches, des caisses d'alimentation et des appareils précédents		15500	31000	26000
	Ventilateurs ou machines soufflantes pour le tirage forcé		7720	8110	12000
	Appareils de réchauffage d'air		»	»	»
	Total des poids II	P_2	33270k.	55703k.	59000k.
	Rapport	$\frac{P_2}{G}$	420k,08	870k,36	633k,74
	Rapport	$\frac{P_2}{GK}$	3 ,192	»	4 ,358
III. Éléments indépendants à la fois de II et de K, qui doivent être simplement rapportés à la surface de grilles G.	Eau des chaudières		175500k.	150000k.	170000k.
	Grilles, maçonnerie et autels		35150	29184	45400
	Cheminées, conduits de fumée, boîtes à fumée		53700	40406	59900
	Feutrage et enveloppes isolantes quelconques		8540	11000	12000
	Outillage et rechanges		30900	10413	10200
	Parquets et échelles des chaufferies		9000	16500	10200
	Total des poids III	P_3	312790k.	257503k.	307700k.
	Rapport	$\frac{P_3}{G}$	3940k,3	4023k,5	3409k,4
Résumé	Poids total	$P_1 + P_2 + P_3$	671850k.	638145k.	734200k.
	Poids total par m² de grilles	$A = \frac{P_1+P_2+P_3}{G}$	8482k,9	9970k,8	8135k,1
	Puissance en chevaux réalisée aux essais par m² de grilles	$B = \frac{F}{G}$	137chx,5	189chx,8	149chx,5
	Poids total par cheval	$D = \frac{P_1+P_2+P_3}{F} = \frac{AC}{K}$	61k,68	52k,52	54k,38

CHAUDIÈRES TYPE AMIRAUTÉ

		Hoche	Matsou-Sima	Dupuy-de-Lôme	Suchet	Linois
Indications générales	Timbre des chaudieres..... .... H	6k,200	12k,000	11k,250	11k,200	11k,250
	Surface de grilles totale..... ..... G	52m2,03	36m2,00	56m2,59	39m2,92	36m2,12
	Surface de chauffe totale ..... S	2130m2,37	1418m2,76	2798m2,00	1922m2,52	1368m2,45
	Puissance en chevaux réalisée aux essais. F	10590chx	6866chx.	13156chx	9504chx.	6727chx.
	Quantité de charbon brûlé par mètre carré de grilles... ..... K	241k.	210k.	220k.	223k.	175k.
	Quantité de charbon brûlé par cheval et par heure aux essais C	1k,166	1k,095	0k,946	0k,945	0k,937
I Eléments qui dépendent de la pression de timbre H, et dont le poids par m2 de grilles doit être rapporté à cette pression H.	Chaudières principales, sans les barreaux de grille ni la maçonnerie.....	292200k	218079k	407626k.	276600k.	164221k.
	Soupapes d'arrêt, de sûreté, de décharge, détendeurs, épurateurs, surchauffeurs...	8860	4820	9921	9000	5050
	Tuyautage et robinetterie des chaufferies..	23100	9650	26717	24000	14380
	Total des poids I..... .. . . . . P_1	324160k.	232549k.	444264k	309600k.	183651k.
	Rapport... . ..... $\frac{P_1}{G}$	6230k,2	6459k,7	7850k,6	7755k,5	5084k,4
	Rapport..... $\frac{P_1}{CH}$	1004 ,88	538 ,30	697k,83	692k,46	451k,95
II Eléments qui dépendent de l'intensité de la chauffe, c'est-à-dire de la quantité de charbon K brûlé par m2 de grilles ou de la quantité d'eau vaporisée par m2 de grilles; le total de ces poids, par m2 de grilles, doit être rapporté à la combustion K.	Pompes alimentaires.....	3200k.	2256k.	12756k.	5500k.	5163k.
	Bâches des pompes alimentaires et caisses de réserve	5800	1622	4168	7800	faisant partiellement corps avec la coque
	Réchauffeurs d'eau d'alimentation.....	»	»	»	»	»
	Filtres à éponges, appareils de purification de l'eau, caisses à eau de chaux.....	»	505	283	»	2630
	Bouilleurs pour réparation des pertes.....	»	1540	4195	3000	2057
	Eau des bâches, des caisses d'alimentation et des appareils précédents.....	15200	6000	10958	8500	9200
	Ventilateurs ou machines soufflantes pour le tirage forcé.....	12000	4157	6141	3500	3153
	Appareils de réchauffage d'air	»	»	»	»	»
	Total des poids II.... .... P_2	36200k.	16080k.	38451k.	28300k.	22203k.
	Rapport..... . .. . $\frac{P_2}{C}$	695k,75	446k,66	679k,46	708k,91	614k,70
	Rapport..... .... $\frac{P_2}{GK}$	2 ,88	2 ,12	3 ,09	3 ,18	3 ,51
III Eléments indépendants à la fois de H et de K, qui doivent être simplement rapportés à la surface de grilles G.	Eau des chaudières.....	181000k.	93000k.	220370k	145810k.	93700k.
	Grilles, maçonnerie et autels.....	27988	12737	23288	26348	12290
	Cheminées, conduits de fumée, bottes à fumée	43400	19707	43500	22000	18693
	Feutrage et enveloppes isolantes quelconques	14500	4360	10000	13850	4300
	Outillage et rechanges	16500	11302	8366	9850	4700
	Parquets et échelles des chaufferies.....	6800	6052	4386	16000	7000
	Total des poids III..... P_3	290188k.	147158k.	309910k.	233858k.	140683k.
	Rapport..... $\frac{P_3}{G}$	5577,3	4087,4	5476,4	5858,2	3894k,8
Résumé.....	Poids total..... $P_1 + P_2 + P_3$	650548k.	395787k.	792625k.	571758k.	346537k.
	Poids total par m2 de grilles $A = \frac{P_1+P_2+P_3}{G}$	12503k,3	10994k,0	14006k,4	14322k,6	9594k,0
	Puissance en chevaux réalisée aux essais par m2 de grilles..... ... $B = \frac{F}{G}$	203chx. 5	190chx,72	232chx,48	238chx,08	186chx,24
	Poids total par cheval $D = \frac{P_1+P_2+P_3}{F} = \frac{AC}{K}$	61k,43	57k,64	60k,24	60k,16	51k,51

CHAUDIÈRES LOCOMOTIVES

			Torpilleurs 104 à 114	Torpilleurs 126 à 129	Bombe	Achéron
Indications générales	Timbre des chaudières	II	9k,33	10k,00	8k,50	6k,00
	Surface de grilles totale	G	2m.q.,30	2m.q.,82	7m.q.,20	8m.q.,00
	Surface de chauffe totale	S	103m.q.,92	132m.q.,21	337m.q.,16	336m.q.,00
	Puissance en chevaux réalisée aux essais	F	525ch.x.,0	1028ch.x.,97	1970ch.x.,3	1690ch.x.,0
	Quantité de charbon brûlé par mètre carré de grilles	K	271k,42	286k,27	287k,33	210k,19
	Quantité de charbon brûlé par cheval et par heure aux essais	C	1 ,188	0 ,784	1 ,050	0 ,995
I. Eléments qui dépendent de la pression du timbre II, et dont le poids par m² de grilles doit être rapporté à cette pression II.	Chaudières principales, sans les barreaux de grille ni la maçonnerie		7000k.	9548k.	25858k.	36932k.
	Soupapes d'arrêt, de sûreté, de décharge, détendeurs, épurateurs, surchauffeurs		125	»	600	2176
	Tuyautage et robinetterie des chaufferies		164	297	1250	4999
	Total des poids I	P_1	7289k.	9845k.	27708k.	44107k.
	Rapport	$\frac{P_1}{G}$	3169k,1	3491k,1	3848k,3	5513k,4
	Rapport	$\frac{P_1}{GII}$	339 ,67	334 ,98	452 ,74	918 ,89
II. Eléments qui dépendent de l'intensité de la chauffe, c'est-à-dire de la quantité de charbon K brûlé par m² de grilles ou de la quantité d'eau vaporisée par m² de grilles; le total de ces poids, par m² de grilles, doit être rapporté à la combustion K.	Pompes alimentaires		166k.	155k.	Conduites par la machine	1826k.
	Bâches des pompes alimentaires et caisses de réserve		249	200	550k,	620
	Réchauffeurs d'eau d'alimentation		»	»	»	»
	Filtres à éponges, appareils de purification de l'eau, caisses à eau de chaux		»	180	»	528
	Bouilleurs pour réparation des pertes		62	65	»	70
	Eau des bâches, des caisses d'alimentation et des appareils précédents		700	700	2200	7090
	Ventilateurs ou machines soufflantes pour le tirage forcé		138	187	710	1774
	Appareils de réchauffage d'air		»	»	»	»
	Total des poids II	P_2	1315k.	1487k.	3460k.	11708k.
	Rapport	$\frac{P_2}{G}$	331k,74	527k,20	480k,55	1488k,50
	Rapport	$\frac{P_2}{GL}$	2 ,29	1 ,82	1 ,60	6 ,52
III. Eléments indépendants à la fois de II et de K, qui doivent être simplement rapportés à la surface de grilles G.	Eau des chaudières		2850k.	4671k.	11760k.	18600k.
	Grilles, maçonnerie et autels		801	1197	2070	2624
	Cheminées, conduits de fumée, boîtes à fumée		559	583	1534	5064
	Feutrage et enveloppes isolantes quelconques		96	100	530	1280
	Outillage et rechanges		150	400	2012	1455
	Parquets et échelles des chaufferies		41	106	782	1000
	Total des poids III	P_3	4497k.	7007k.	18688k.	20023k.
	Rapport	$\frac{P_3}{G}$	1955k,2	2484k,7	2595k,5	3752k,8
Résumé	Poids total	$P_1+P_2+P_3$	13101k.	18339k.	49856k.	86038k.
	Poids total par m² de grilles A =	$\frac{P_1+P_2+P_3}{G}$	5696k,1	6503k,2	6924k,4	10754k,7
	Puissance en chevaux réalisée aux essais par m² de grilles B =	$\frac{F}{G}$	228ch.x.,26	364ch.x.,88	273ch.x.,65	211ch.x.,25
	Poids total par cheval D =	$\frac{P_1+P_2+P_3}{F} = \frac{AC}{K}$	24k,95	17k,82	25k,30	50k,91

96. — *Encombrement.* — Après avoir donné les poids des différents types de chaudières tubulaires, nous ajoutons dans le tableau ci-dessous quelques indications générales sur l'encombrement de ces appareils.

		NOMS des BATIMENTS	Projection horizontale de la chaudière c	Projection horizontale des grilles g	RAPPORT $\frac{c}{h}$
Chaudières à simple façade	2 foyers	Sfax	9,512	3,990	2,384
	2 foyers		10,301	4,343	2,371
	3 foyers	Manche	8,564	4,070	2,104
	3 foyers	Amiral-Baudin	9,877	5,910	1,671
	3 foyers	Isly	13,952	6,850	2,036
	3 foyers		13,440	6,530	2,058
	3 foyers	Bretagne, paquebot (anciennes chaudières)	13,485	6,510	2,071
Chaudières à double façade	3 foyers (Boîte à feu commune)	Cécille	23,490	13,200	1,779
			23,229		1,759
	3 foyers	Capitan-Prat	24,77	12,800	1,935
	4 foyers (2 boîtes à feu séparées par une lame d'eau)	D'Entrecasteaux	26,026	18,050	1,441
	4 foyers (2 boîtes à feu séparées par une lame d'eau)	Columbia	30,597	15,610	1,960
Chaudières à flamme directe	3 foyers	Hoche	20,125	6,504	3,094
	3 foyers	Matsou-Sima	17,088	6,000	2,848
	2 foyers	Dupuy-de-Lôme	18,720	5,310	3,525
	2 foyers	Suchet	17,617	4,360	4,040
	2 et 3 foyers	Linois	17,193	6,615	2,599
			15,007	4,830	3,107
Chaudières locomotives	1 foyer	Torpilleurs de 35 mèt (nos 105 à 114)	8,809	2,300	3,827
	1 foyer	Torpilleurs (127 à 129)	10,781	2,820	3,823
	1 foyer	Bombe	7,227	1,800	4,015
	1 foyer	Achéron	8,832	1,780	4,961

TROISIÈME PARTIE

CHAUDIÈRES TUBULEUSES

TROISIÈME PARTIE

CHAUDIÈRES TUBULEUSES

97. — *Introduction des chaudières tubuleuses dans la marine.* — Les appareils à vapeur subissent en ce moment, du moins pour la Marine de guerre, une transformation complète. L'ancienne disposition, qui plaçait la flamme et les gaz chauds à l'intérieur de la masse d'eau et de vapeur, et qui a mis jadis la flotte en bois à l'abri des dangers d'incendie, est abandonnée. L'eau est maintenant au milieu de la flamme ; la vapeur, qui agissait par compression sur les foyers et tous les courants de flamme, ne fait plus travailler le fer que par expansion. L'enveloppe extérieure n'est qu'une simple tôle mince, parfois protégée à l'intérieur par des tubes d'eau presque jointifs, toujours revêtue extérieurement de substances isolantes ; c'est la boîte à fumée que l'on rencontre ainsi à la périphérie, au lieu du réservoir d'eau et du coffre à vapeur.

Si bien tranchée que soit la différence entre les deux systèmes dont l'un tend à se substituer à l'autre, on n'a pas pu tomber d'accord jusqu'ici sur les noms qui sont propres à les définir exactement. Le nom de *chaudières à tubes bouilleurs* opposé au nom de *chaudières à tubes carneaux*, résout mal la question, puisqu'il y a eu des chaudières rectangulaires à tubes carneaux (modèle Martin-Cochrane). En réalité, c'est plutôt l'enveloppe qui diffère ; mais plusieurs modèles à tubes bouilleurs ont des lames d'eau à l'extérieur. Le nom de chaudières *multitubulaires* est tout à fait impropre, appliqué à des modèles qui, parfois, comprennent un moins grand nombre de tubes que les autres. Je me servirai le plus souvent du nom de *chaudières tubuleuses* qui a du moins le mérite de la simplicité, en l'opposant au nom de *chau-*

dières tubulaires que la pratique a consacré pour les anciennes chaudières, rectangulaires ou cylindriques. Le nom importe assez peu, d'ailleurs, car il n'y a aucune ambiguïté sur le fond des choses.

Il n'est pas très exact d'appliquer le nom d'*anciennes* aux chaudières tubulaires et celui de *nouvelles* aux chaudières tubuleuses; plusieurs modèles de chaudières tubuleuses sont antérieurs aux chaudières cylindriques; mais, tandis que les chaudières tubulaires avaient pris, il y a vingt à trente ans, un développement très étendu, lors de l'adoption de la forme cylindrique, les chaudières tubuleuses n'ont eu, au contraire, qu'un développement très lent. Il a fallu, pour faire entrer ces dernières en usage, des motifs impérieux, l'importance croissante de la question de légèreté, et l'adoption des hautes pressions que seules elles sont capables de supporter.

Deux causes retardaient l'adoption des chaudières tubuleuses, malgré leurs avantages reconnus. La première était dans les difficultés de conduite, qui n'ont été surmontées que progressivement et qui subsistent encore en partie. La seconde était dans la corrosion des fers minces, qui rend toujours leur durée problématique; de ce côté aussi, des progrès ont été réalisés; mais, en même temps, l'adoption des tubes en fer sur les chaudières cylindriques a fait perdre à ces dernières une partie de leur ancienne supériorité. Les deux motifs d'infériorité des chaudières tubuleuses ont donc été constamment en s'affaiblissant.

Actuellement les chaudières tubuleuses ont pris possession complète, dans la plupart des marines, des torpilleurs et de la classe de plus en plus nombreuse des torpilleurs agrandis, tels que contre-torpilleurs, torpilleurs divisionnaires, etc. ; elles se sont répandues sur les croiseurs et elles commencent à apparaitre sur les cuirassés; elles laissent encore une certaine place aux chaudières cylindriques sur quelques navires de guerre destinés aux longues campagnes, et elles ne figurent sur les paquebots qu'à titre très exceptionnel. C'est à l'expérience acquise sur les torpilleurs qu'est surtout due la récente extension des chaudières tubuleuses.

Les modèles de chaudières tubuleuses sont extrêmement variés ; plusieurs n'ont été employés qu'à terre; nous nous bornerons à l'étude de ceux qui ont été adoptés sur les navires, en nous arrêtant seulement sur les plus usités. Laissant de côté les dispositions de détail, nous trouvons un élément de classification naturelle dans l'importance variable donnée à la circulation de l'eau à l'intérieur de la chaudière ; c'est ainsi que dans l'introduction, chapitre II, nous avons distingué trois groupes de modèles différents, savoir : les chaudières à circulation limitée, les chaudières à circulation libre, les chaudières à circulation

accélérée. Ce classement correspond assez bien à l'ordre historique suivant lequel les chaudières ont été inventées.

Les *chaudières à circulation limitée*, qui pourraient s'appeler aussi chaudières à serpentins, se distinguent par l'absence de réservoirs d'eau; leur type est donné par la chaudière Belleville.

Les *chaudières à circulation libre*, pourraient s'appeler chaudières à réservoirs verticaux et tubes horizontaux; les réservoirs sont généralement formés de deux lames d'eau. Les principaux inventeurs, et les plus connus, sont MM. Joessel, Oriolle, D'Allest, Collet ou Niclausse, du moins pour les modèles français.

Les *chaudières à circulation accélérée* ont, pour caractère distinctif, des tubes verticaux de forme variable placés entre des réservoirs horizontaux le plus souvent cylindriques. Les premiers inventeurs ont été M. Sochet, puis le commandant Du Temple; les modèles actuels varient presqu'à l'infini avec les constructeurs, Thornycroft, Normand, Yarrow, Mosher, Guyot et plusieurs autres, dont nous trouverons plus loin les noms et les travaux.

Les trois désignations, *limitée*, *libre*, *accélérée*, ne marquent pas des degrés successifs régulièrement croissants dans l'intensité de la circulation. La circulation libre est, par là même, libre d'être insuffisante aussi bien que d'être parfaite. Il est possible, par exemple, que certains tubes d'une chaudière D'Allest soient plus exposés que les tubes d'une chaudière Belleville à la formation de chambres de vapeur. De même une chaudière à circulation accélérée peut présenter une circulation faible dans quelques-uns des tubes de son faisceau.

CHAPITRE XI

CHAUDIÈRES A CIRCULATION LIMITÉE OU A SERPENTINS

98. — *Caractère général des chaudières à circulation limitée.* — Le caractère particulier de ces chaudières consiste dans l'emploi de tubes qui s'élèvent en replis successifs et dont chacun reçoit l'eau à sa base et dégage la vapeur à son sommet. Le mouvement de l'eau est ainsi limité à ce qu'il faut pour subvenir à l'évaporation et à l'entraînement de l'eau vésiculaire par la vapeur. Le mouvement des bulles de vapeur s'opère ainsi dans une eau presqu'immobile, et leur vitesse est toujours assez faible.

99. — *Historique de la chaudière Belleville.* — L'histoire de la chaudière Belleville a été celle de la chaudière tubuleuse marine elle-même,

Générateurs de la Biche (Modèle 1855)

Echelle de 1/20 Coupe en élévation

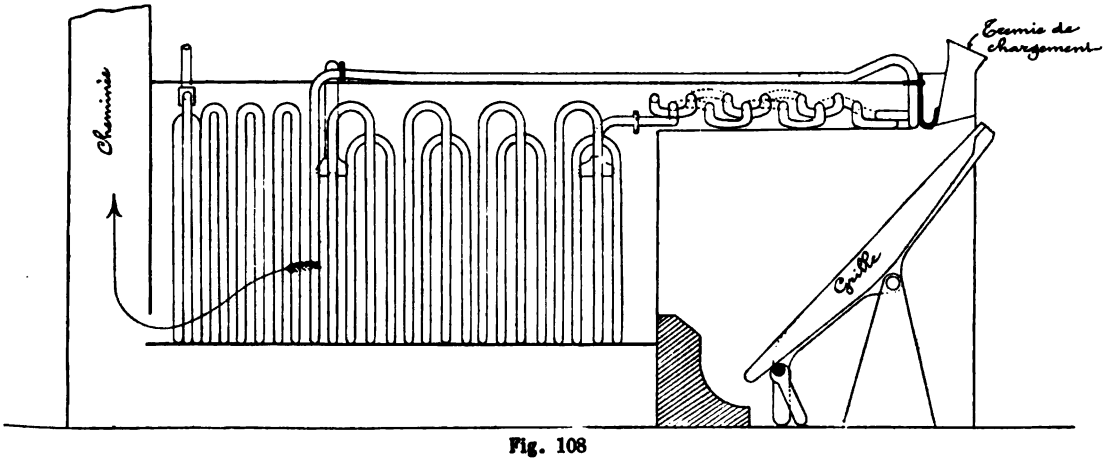


Fig. 108

pendant une longue période. M. Belleville a été le premier, en effet, à aborder de front dans toute sa complexité, la question délicate de l'emploi des chaudières tubuleuses sur les navires ; il a appliqué une rare constance, et une grande fertilité de ressources, à la solution des problèmes variés qui surgissaient à chaque pas dans la voie qu'il a ouverte.

Chaudière de l'Argus

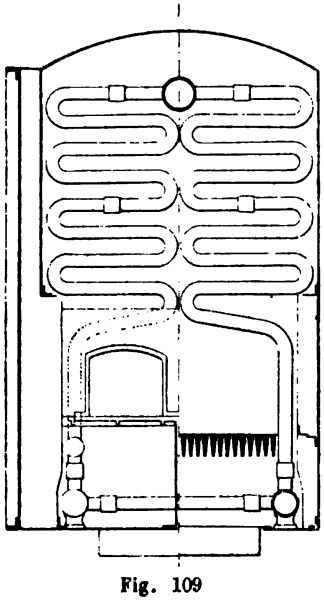


Fig. 109

Les premières chaudières Belleville furent essayées sur la *Biche* en 1856 ; elles se composaient de tubes verticaux en fer formant serpentins, dans lesquels l'eau circulait en sens inverse du courant de flamme extérieur (fig. 108). La vaporisation s'y produisait instantanément ; les derniers replis des serpentins, que frappait directement la flamme, ne contenaient que de la vapeur et servaient à la surchauffer. Les essais ne réussirent pas ; il en fut de même pour les chaudières de l'*Argus* et de la *Sainte-Barbe* en 1861 ; mais les qualités personnelles de l'inventeur furent très justement appréciées par M. Mangin et M. Dupuy de Lôme qui encouragèrent ses recherches ultérieures.

Dix ans plus tard, les chaudières Belleville reparurent, avec des serpentins analogues à ceux de l'*Argus* et composés de tubes horizontaux autour desquels la flamme s'élevait, de manière à rencontrer d'abord des tubes pleins d'eau. La vapeur était recueillie à la partie supérieure, par un tube transversal ou collecteur surmonté d'un second tube appelé *diviseur* avec lequel il communiquait par des orifices de très faible section (fig. 110). Cette disposition était destinée à prévenir les entraînements d'eau. Les nouvelles chaudières furent établies sur le transport la *Vienne*, l'aviso l'*Actif*, quelques canonnières type *Oriflamme*, et surtout sur les canots à vapeur dont l'emploi commençait à se répandre. Sur les canots, elles donnèrent d'assez bons résultats pour que le modèle, un peu modifié, ait été conservé jusqu'à l'époque actuelle ; la figure 111 représente une chaudière encore en service.

En 1869, la chaudière Belleville parut arriver à un degré suffisant de perfection, comme construction et comme fonctionnement, pour que Dupuy de Lôme l'adoptât sur le yacht l'*Hirondelle* dont la vitesse exigeait l'emploi des hautes pressions. La figure 112 donne la coupe

Canot à vapeur (Modèle 1866)

Tube diviseur.

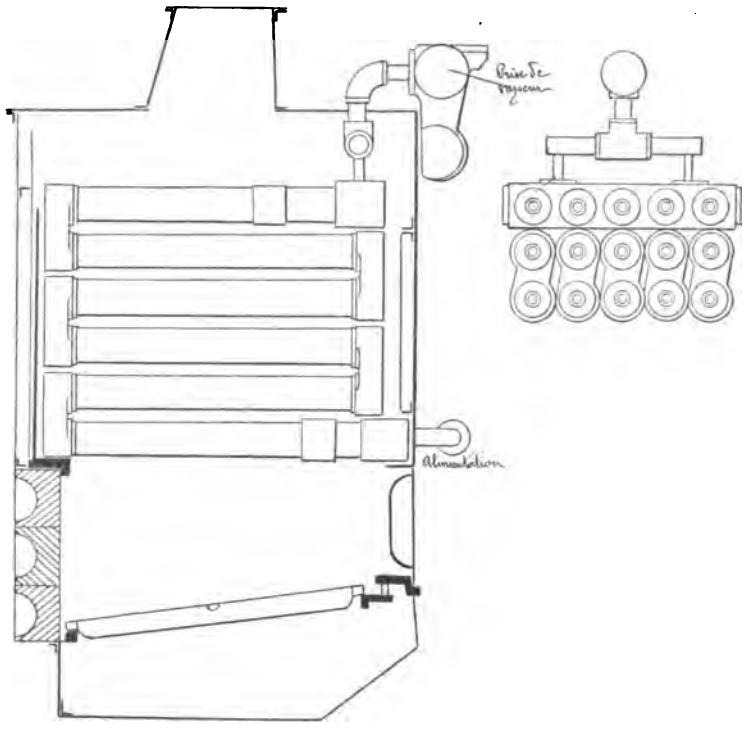


Fig. 110 et 110 *bis*.

Canot à vapeur (Modèle 1895).

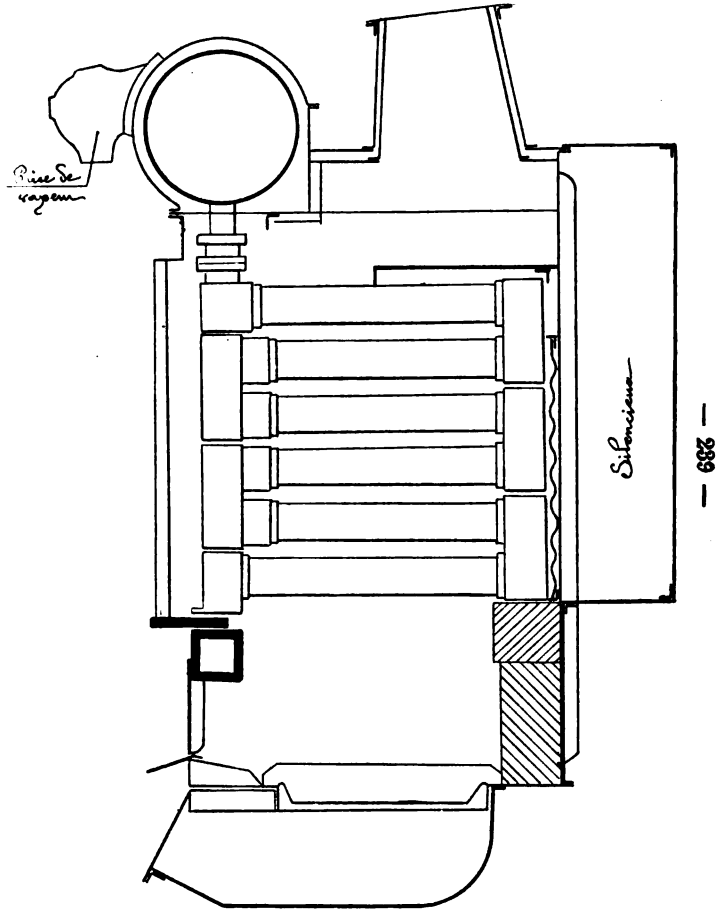


Fig. 111

transversale des premiers générateurs de l'*Hirondelle*; on y voit le collecteur d'alimentation à la base et le collecteur, de vapeur au sommet, avec le tube diviseur placé au-dessus. La construction est celle des chaudières de canots; les serpentins sont composés de tubes horizontaux avec boites de raccord verticales.

Hirondelle (*Modèle 1869*)

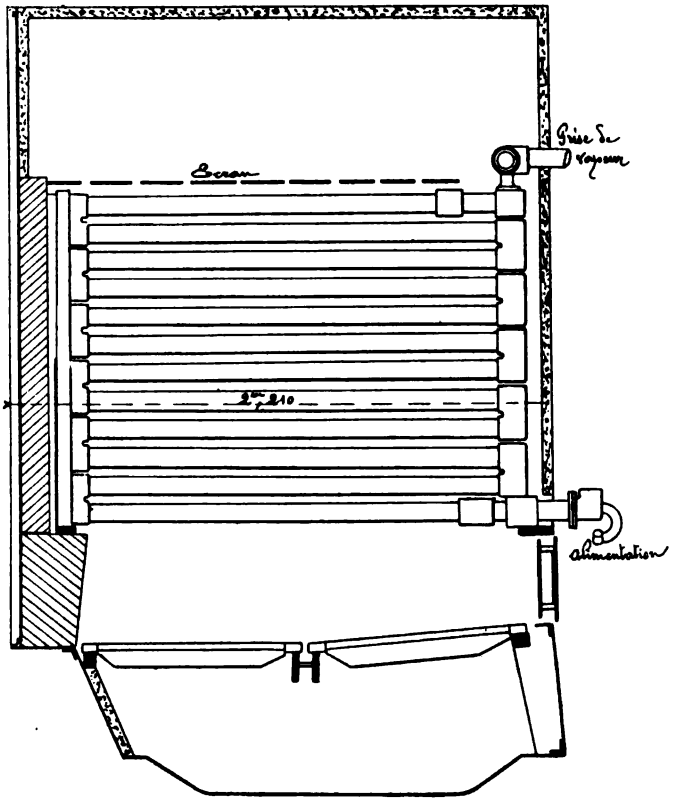


Fig. 112

Tube diviseur

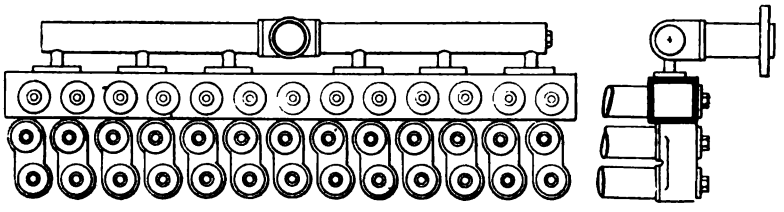


Fig. 113

La principale innovation, sur les chaudières de l'*Hirondelle*, fut l'adop-

tion des régulateurs automatiques d'alimentation à flotteurs, encore en service sur les chaudières Belleville actuelles, qui seront décrits au n° 173. La régulation automatique avait paru indispensable pour maintenir les niveaux constants partout, dans douze générateurs, qui ne contenaient ensemble que 3.251 litres d'eau. Un épurateur vertical avait été disposé sur le tuyau de vapeur, pour arrêter l'eau entraînée.

Hirondelle (*Modèle 1872*)

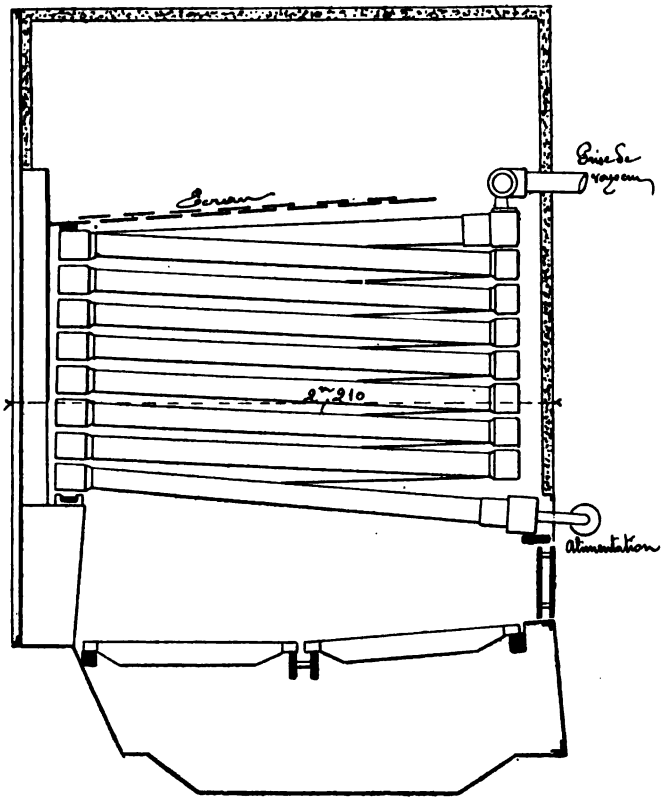


Fig. 114

L'expérience acquise depuis lors ne permet pas de considérer le modèle 1869 comme capable de faire le service, qui était nécessaire sur l'*Hirondelle*; on parvint cependant à exécuter le 21 mars 1870 un essai satisfaisant, dans lequel, en brûlant 97k,3 de charbon par mètre carré de grilles, on obtint 9k,3 de vapeur sensible sur les diagrammes par kilogramme de charbon. La consommation de charbon par cheval était de 1k,7, chiffre très acceptable avec des machines à simple détente. Plus tard ces résultats ne purent plus être reproduits, et, après une

année de fonctionnement pénible, la transformation des chaudières fut reconnue nécessaire.

Avec les parties en bon état des dix-huit premiers générateurs, on en refit neuf. La seconde moitié de l'appareil fut construite sur un modèle nouveau représenté sur la figure 114, dans lequel les tubes étaient inclinés et réunis par des boîtes de raccord horizontales, disposition adoptée définitivement depuis cette époque pour faciliter le dégagement de la vapeur. Sur le modèle 1872, les tubes diviseurs étaient conservés, comme unique moyen de régulariser le débit de vapeur. Les régulateurs d'alimentation à flotteur étaient remplacés par d'autres appareils, actionnés par la différence de pression entre le haut et le bas de la chaudière, qui ont assez bien fonctionné, mais n'ont pas été reproduits.

Les essais comparatifs exécutés en 1873, entre les deux modèles de chaudières Belleville, sont encore intéressants à consulter, car on y rencontra des difficultés qu'il ne faut pas perdre de vue, même aujourd'hui, quand on installe de puissantes chaudières tubuleuses.

Les chaudières modèle 1869 eurent un fonctionnement irrégulier, dû surtout au mauvais dégagement de la vapeur. Il se produisit des soulèvements d'eau complets, pendant l'un desquels tous les tubes des rangées inférieures, remplis de vapeur, vinrent à rougir. De plus, en raison de l'absence de réservoir de vapeur, le moindre incident de chauffe avait sa répercussion immédiate sur l'allure de la machine, dont le travail oscillait entre 660 et 985 chevaux; l'irrégularité était surtout grande quand le charbon brûlait en couche mince; avec le charbon en couche épaisse, on produisait un excès de fumée, on faisait rougir la cheminée, on brûlait jusqu'à 2 k,4 par cheval.

Sur les chaudières modèle 1872, la vapeur se dégageait mieux, mais d'autres inconvénients rendaient le résultat pire. Pour régulariser le débit de vapeur, on avait limité la section totale des tubes diviseurs à 7,64 centimètres carrés par chaudière. La dépression fut telle qu'avec la pression de quatre kilogrammes aux chaudières, qui correspondait à la charge des soupapes, on avait tout juste un kilogramme de pression aux machines. Quand on rendit aux tubes diviseurs une section convenable, pour ramener la dépression à 1 kilogramme ou 1k,30, on eut de violents entraînements d'eau aux machines, et il fallut ralentir la combustion. Comme conséquence de l'irrégularité du fonctionnement, la production de vapeur par kilogramme de charbon resta très faible.

Après l'échec de l'*Hirondelle*, M. Belleville, moins découragé que jamais, jugea très sainement que son modèle 1872 ne pêchait que par des détails, spécialement du côté de l'émission de vapeur. Il conserva donc toute la construction, qui n'a guère varié depuis lors; il supprima

les tubes diviseurs, établit un coffre à vapeur ou *séparateur*, et plaça sur le tuyau de vapeur un *détendeur* ou soupape régulatrice, dont l'effet, réglable à volonté, devait remplacer avec avantage celui des tubes diviseurs. Un tuyau de descente était disposé pour ramener l'eau du séparateur au collecteur d'alimentation, en passant par un *déjecteur* où devaient s'accumuler les dépôts solides. La chaudière restait munie du régulateur automatique d'alimentation à flotteur, dont le réservoir portait le tube de niveau. Ainsi fut créé le modèle 1878, essayé avec succès en 1880 sur le *Voltigeur*, dont l'emploi s'est bientôt répandu.

Les principales applications des chaudières Belleville ainsi disposées sont celles de la marine militaire française sur le *Rigault-de-Genouilly*, l'*Hirondelle* (nouvel appareil), le *Milan* (fig. 14), l'*Alger*, le *Léger*, le *Lévrier*, le *Charner*, le *Bruix*, le *Bugeaud*, le *Tréhouart*, le *Brennus*, le *Bouvet*, etc. L'Amirauté anglaise les a essayées sur le *Sharpshooter*, et adoptées sur ses grands croiseurs *Powerful* et *Terrible*; d'autres marines de guerre ont suivi le même exemple. Enfin depuis l'*Ortégal* en 1884, tous les paquebots des Messageries maritimes, *Sindh*, *Australien*, *Polynésien*, *Armand-Béhic*, etc., ont reçu des chaudières Belleville. Ce sont, en somme, de toutes les chaudières tubuleuses, celles qui ont été le mieux éprouvées et dont l'emploi laisse actuellement le moins de place à l'incertitude.

100.— *Description de la chaudière Belleville.* — La chaudière Belleville actuelle, c'est-à-dire le modèle le plus nouveau, actuellement éprouvé par le service, se compose de rangées verticales de neuf ou dix tubes parallèles, inclinés de 2 à 3° sur l'horizon. Deux files inclinées en sens inverse, dont les tubes voisins forment une fourche et sont réunis d'une file à l'autre par des boîtes de raccord horizontales, constituent un élément. Le niveau de l'eau est, en principe, au-dessus du cinquième tube, de manière à laisser quatre ou cinq tubes remplis de vapeur.

L'eau est distribuée aux divers éléments par le collecteur inférieur d'alimentation, de section rectangulaire, placé au-dessus des portes de foyers, dans lequel les boîtes de raccord inférieures prennent l'eau par un petit ajutage conique traversant la paroi supérieure, et auquel elles sont assemblées par une bride avec un simple boulon (fig. 119).

Le mélange d'eau et de vapeur émis à la partie supérieure des éléments se rend par de courtes boîtes de raccord dans le réservoir supérieur cylindrique, dans lequel se fait la séparation de la vapeur et de l'eau, et sur lequel sont établies les prises de vapeur.

Le principe des appareils divers d'assèchement d'un courant de vapeur, qui consiste à donner à la trajectoire des courbures brusques,

de telle sorte que les particules liquides aillent se déposer sur la paroi extérieure concave du canal, paraît avoir été appliqué pour la première

Chaudière du Charlemagne

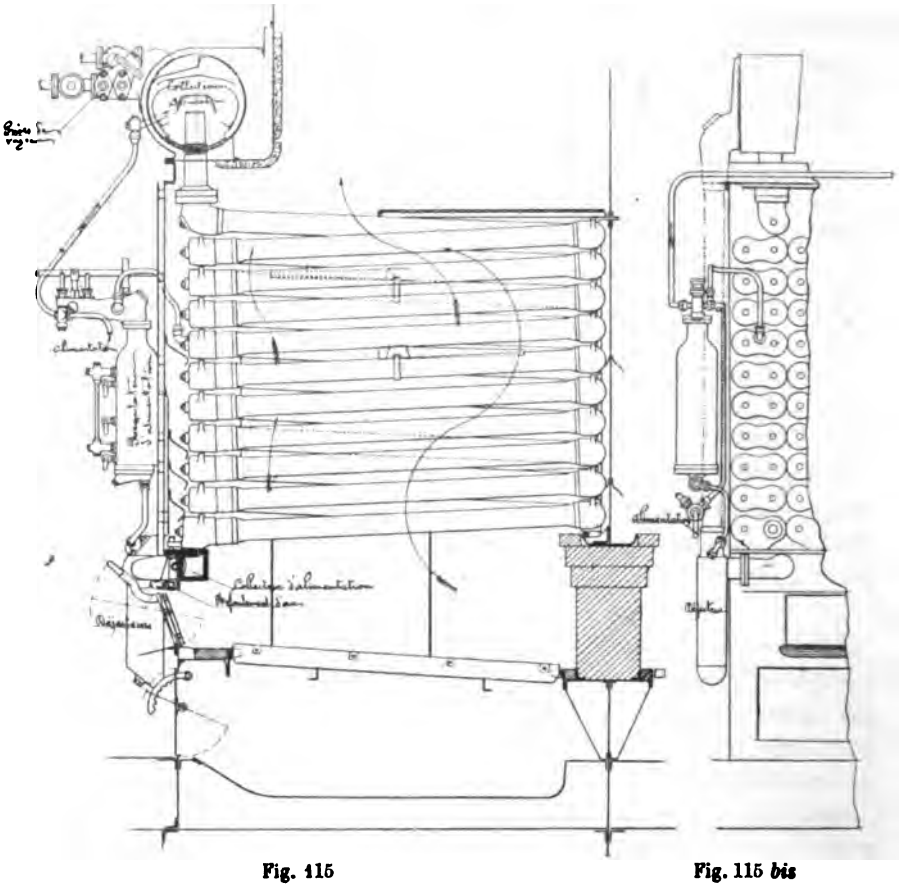


Fig. 115 Fig. 115 *bis*

fois dans les séparateurs de M. Belleville. Le profil des écrans placés longitudinalement dans le réservoir cylindrique, pour produire ainsi la séparation, a beaucoup varié ; les deux figures ci-après représentent la disposition la plus simple (fig. 117), et celle qui était adoptée en 1894 (fig. 116). Le bord des écrans est dentelé.

L'arrivée d'eau d'alimentation est dans le séparateur et au milieu de la vapeur, de manière à produire l'échauffement immédiat. Le jet, lancé à une très haute pression, tombe sous forme de poussière liquide ; cette disposition a peut-être été imaginée, au début, pour produire une précipitation immédiate des sels ; M. Belleville comptait en effet sur la possibilité d'alimenter à l'eau de mer, grâce à cette précipitation et au fonctionnement des déjecteurs.

De chaque côté, une colonne de descente, formée d'un gros tube vertical, réunit le séparateur au collecteur d'alimentation, et se prolonge, en bas, par la boîte de dépôts ou déjecteur.

Séparateur ou collecteur épurateur de vapeur et d'eau d'alimentation.

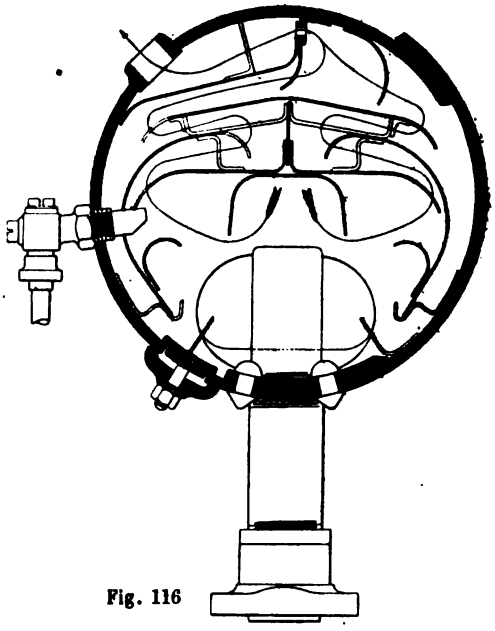


Fig. 116

Si maintenant nous considérons le parcours des flammes, nous trouvons la grille, dont les barreaux ont maintenant la disposition ordinaire; l'ancienne grille Belleville a été décrite au n° 29, (fig. 25 et 25 *bis*). Les gaz chauds s'élèvent verticalement à travers le faisceau de tubes. Pendant très longtemps, le rendement des chaudières Belleville a souffert par suite du défaut de longueur des flammes, qui étaient refroidies avant combustion complète, et du défaut de longueur du parcours des gaz chauds, qui arrivaient à la cheminée avant d'être dépouillés de leur chaleur. La longueur du parcours des gaz a été accrue, en disposant quelques écrans horizontaux en tôle, formant des chicanes dans le faisceau tubulaire. La longueur de la flamme ne pouvant être augmentée, on y a obvié par un brassage énergique, qui permet à la combustion de s'opérer sur un parcours moindre; ce brassage a été obtenu avec l'ancien appareil Bourdon-Thierry, lançant au-dessus de la grille des jets de vapeur ou mieux d'air comprimé, qui, très peu efficaces dans les chaudières à longs foyers horizontaux, donnent au contraire, sur les chaudières Belleville, des résultats satisfaisants. La chaudière Belleville, ainsi améliorée, est devenue un appareil économique au tirage

naturel, pouvant même supporter un léger tirage forcé ; il ne faut pas toutefois lui imposer des intensités de combustion dépassant 110 à 120 kilogrammes par mètre carré de grilles, bien que l'essai ait été poussé plus loin.

Séparateur ou collecteur épurateur de vapeur et d'eau d'alimentation.

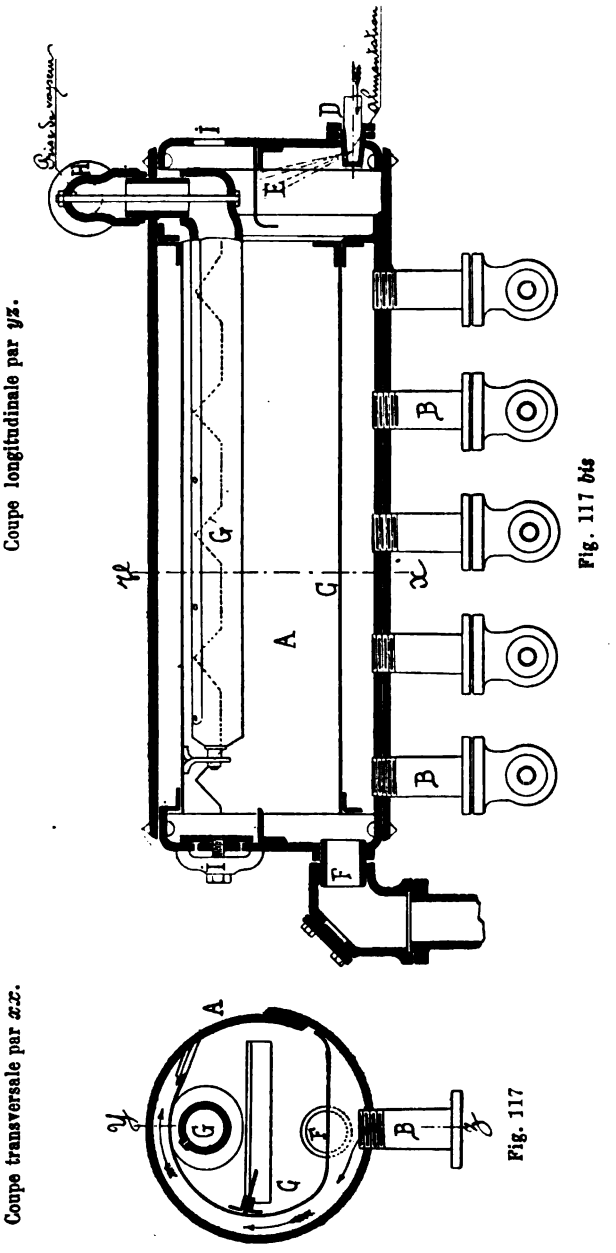


Fig. 117 *bis*

Fig. 117

L'enveloppe extérieure est en tôle mince, avec revêtement en maçonnerie de briques à la hauteur des foyers, et double enveloppe remplie d'escarbilles au-dessus; la façade est fermée par de simples portes.

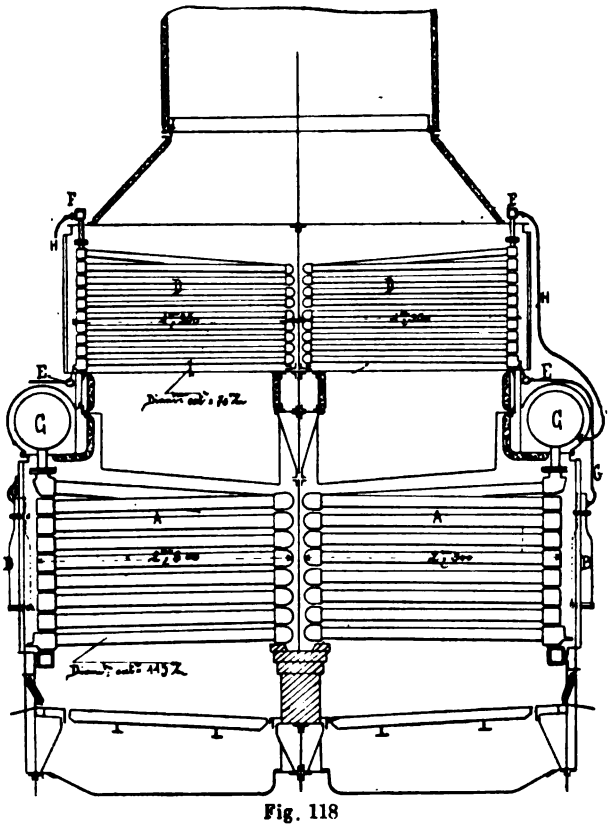


Fig. 118

A Eléments générateurs.
B Régulateur d'alimentation.
C Séparateur d'eau et de vapeur.
D Eléments économiseurs (réchauffeur d'alimentation).
E Collecteur d'eau froide des éléments D.
F Collecteur d'eau chaude des éléments D.
G Tuyau d'eau allant du régulateur B à l'économiseur D.
H Tuyau d'eau allant de l'économiseur D au séparateur C.

Surface de grilles pour 8 générateurs	38m²,98
» chauffe »	356 ,76
» » pour 8 économiseurs	387 ,59
Surface de chauffe totale	1344m²,85
Rapport à la surface de grilles	34 ,48

La chaudière Belleville vient de recevoir en 1896, une nouvelle forme, par l'addition d'un réchauffeur d'eau d'alimentation à la base de la cheminée ; en même temps le nombre des fourches, ou tubes doubles a été réduit de 10 à 8 dans les éléments principaux. La nouvelle chaudière est représentée figure 118. Elle est formée de la réunion de deux

chaudières, l'une au-dessus, l'autre au-dessous du séparateur. La température de l'eau s'élève en allant de bas en haut dans les deux faisceaux; il a paru trop dangereux de donner la direction inverse au courant d'eau dans le réchauffeur. L'eau d'alimentation réchauffée traverse le générateur. Les données principales sont, pour une chaudière double :

Surface de grilles	4^{m^2},08
Surface de chauffe	100, 36
Surface de réchauffage d'alimentation .	50, 66.

Ces nouvelles chaudières, destinées à deux paquebots des Messageries et aux cuirassés anglais type *Canopus*, n'ont pas encore été essayées à bord. Dans une chaudière à terre, les résultats ont été très satisfaisants; l'économie de charbon annoncée est de 20 à 22 % par rapport aux chaudières ordinaires à dix fourches. On espère pouvoir développer le tirage forcé.

101. — *Détails de construction.* — Des perfectionnements successifs, apportés depuis plus de quarante ans, ont fait de la chaudière Belleville un appareil remarquable sous le rapport de la construction. Toutes les pièces se montent sur place avec une grande facilité, ce qui dispense d'avoir les vastes panneaux d'embarquement, si souvent difficiles à établir. Le remplacement d'un élément dans lequel un tube serait avarié peut se faire dans deux heures. Le remplacement du tube lui-même, quand on a pas d'éléments complets de rechange, peut se faire en quatre ou cinq heures. Il faut noter en particulier les boîtes de raccord aujourd'hui en acier moulé; leur filetage présente une très légère différence sur la boîte et le tube, ce qui assure un portage étanche en un point; le joint est complété par une bague filetée, serrée sur un lit de mastic. La différence, entre le temps nécessaire pour remplacer un élément, et celui qu'exige le changement d'un tube dans un élément, tient à ce que les bagues peuvent rarement se dévisser après quelques temps de chauffe; il faut donc les couper au burin. Les tubes eux-mêmes ne peuvent pas toujours se retirer des boîtes de raccord.

Raccordement d'un élément avec le collecteur d'alimentation

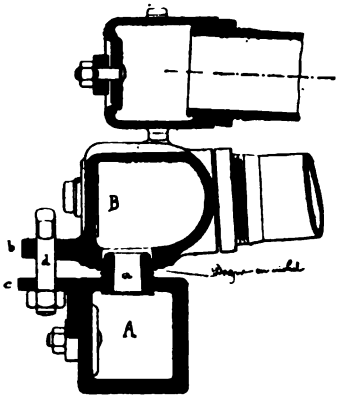


Fig. 119

Les boîtes reposent les unes sur les autres par de petits tétons. Les tubes sont donc simplement tenus en place par leurs poids; toutes les dilatations peuvent se produire librement.

Les tubes ont de 82 millimètres à 115 millimètres de diamètre extérieur dans les chaudières de la marine de guerre, et 125 millimètres sur les paquebots. Leur écartement horizontal, est de 25 millimètres. Leur écartement vertical est de 30 millimètres pour les tubes de 82 millimètres, et respectivement de 30 millimètres et de 50 millimètres pour ceux de 115 millimètres et 125 millimètres. Leur épaisseur est de 10 millimètres, pour les deux et les trois rangées horizontales inférieures, et de 5 millimètres ou 6 millimètres, pour toutes les autres. Ces données subissent d'ailleurs quelques variations d'un appareil à l'autre.

L'adoption des tubes en fer sans soudure, étirés à chaud et calibrés à froid, a fait réaliser un sérieux progrès au point de vue de la durée et de la conservation. Malgré le soin pris, d'introduire un peu de chaux dans l'eau alimentaire, les tubes étaient autrefois très exposés à des piqûres locales; ils se décollaient même quelquefois à la soudure en cas de coup de feu.

102. — *Propriétés générales. — Durée des chaudières Belleville.* — Une des propriétés des chaudières Belleville est leur grande rusticité, leur permettant de supporter de mauvais traitements sans danger d'avaries. Elles n'ont rien à craindre des irrégularités de dilatation, ce qui permet de conduire vivement l'allumage et la mise en pression, de faire varier brusquement la chauffe, de mettre bas les feux sans ménagement.

Le cintrage, parfois très accentué, que les tubes des rangées inférieures présentent après un service prolongé, ne compromet pas la tenue des emmanchements. Les tubes sont en état de supporter des pressions intérieures de 60 kilogrammes, et les séparateurs, des pressions de 20 kilogrammes, sans que la charge des matériaux dépasse 6 ou 7 kilogrammes par millimètre carré. Aujourd'hui divers modèles de chaudières tubuleuses possèdent les mêmes avantages; mais les chaudières Belleville en ont eu assez longtemps le monopole; c'est comme appareils inexplosibles que le constructeur les prônait, surtout pour le service à terre où l'on n'a pas à tenir compte des questions de poids et d'encombrement. Les garanties de sécurité contre les explosions ne doivent pas exclure toutefois les mesures de prudence dans la conduite des appareils. Les fuites de vapeur, par un tube simplement percé, peuvent être dangereuses; elles ont parfois infligé des brûlures graves aux chauffeurs qui ouvraient les portes de visite de la façade.

La chaudière Belleville est le seul modèle de chaudières tubuleuses employé depuis assez longtemps, pour qu'on eut pu avoir des notions exactes sur sa durée. On doit reconnaître que cette durée n'a pas une valeur déterminée, parce que les diverses parties de la chaudière s'usent

très inégalement. Comme le remplacement des parties endommagées est facile, on procède par une série de réparations partielles et non par un remplacement intégral. C'est dans ces conditions que le *Voltigeur* possède encore, après seize ans, ses chaudières primitives, Sur les canots à vapeur, on trouve parfois, au bout d'une dizaine d'années, les chaudières en assez mauvais état pour ne pas mériter la réparation; mais, à cette date, la plupart des tubes ont déjà été changés, et quelques-uns plus d'une fois, depuis la mise à bord.

103. — *Poids et encombrement.* — Dans leur état actuel les chaudières Belleville, pour grands navires, pèsent 5^{tx},85 par mètre carré de grilles, eau et accessoires compris; on dépasse un peu ce chiffre pour les appareils déjà anciens comme celui de l'*Alger*, on reste au-dessous pour les plus récents comme celui du *Pothuau*, qui a réalisé une économie de 35 tonnes soit 11 % sur les prévisions. Les derniers appareils construits, *Charlemagne*, *Gaulois*, *Saint-Louis*, ne pèsent que 5^{tx},35.

La division qui a été faite, à l'occasion des chaudières cylindriques, entre les éléments dont le poids dépend de la pression, ceux dont le poids dépend de l'intensité de la chauffe, et ceux dont le poids dépend seulement de la grandeur de l'appareil représentée par la surface de grilles, n'est pas très exactement applicable aux chaudières tubuleuses. Les tubes pressés intérieurement, qui composent la première portion pour une très grande part, n'auraient nullement besoin d'une augmentation de poids pour supporter des pressions doubles ou triples de celles auxquelles ils sont soumis. Cette remarque est particulièrement applicable aux chaudières Belleville qui ne comportent qu'un simple réservoir de peu d'importance, toutes les autres capacités soumises à la pression étant formées de tubes. Quoi qu'il en soit, pour avoir des nombres qui correspondent à ceux donnés pour les chaudières cylindriques, la même division a été conservée, dans les tableaux du n° 158, où sont inscrits les poids des divers éléments des chaudières Belleville.

104. — *Avantage particulier à la circulation limitée.* — En terminant l'étude des chaudières à circulation limitée, il est important de remarquer que, dans ces chaudières, on peut régler à volonté la direction du courant d'eau, aussi bien que son intensité. Par suite, il est possible de faire marcher l'eau en sens inverse de la flamme, de mettre les parties les plus froides de la chaudière en contact avec la partie la plus refroidie de la flamme ou de la fumée, et, par suite de dépouiller les gaz chauds de leur chaleur d'une manière plus complète que dans les chaudières tubuleuses des autres systèmes.

Cette propriété sérieuse semble bien avoir été prise en considération dès le début par M. Belleville, et avoir inspiré la disposition de la chaudière primitive représentée figure 108. Elle a été utilisée plus tard par M. Herreschoff dans sa chaudière à serpentins hélicoïdaux, qui recevait l'eau d'alimentation à la partie supérieure près de la base de la cheminée. Les chaudières Belleville des derniers modèles, dans leurs réchauffeurs d'alimentation, mettent en partie à profit cette même propriété.

La chaudière à pétrole du commandant Renard est aussi une chaudière à circulation limitée, dans laquelle les gaz de la combustion peuvent être refroidis jusqu'à la limite théorique de la température de l'eau d'alimentation. Cette dernière chaudière, d'une extraordinaire légèreté, est destinée à un genre spécial de navigation, la navigation aérienne, qui ne rentre pas dans le cadre de notre étude, mais dont les progrès pourront être un jour utilisés pour la navigation proprement dite.

CHAPITRE XII

CHAUDIÈRES A CIRCULATION LIBRE

105. — *Premiers modèles à circulation libre. — Principe des appareils. — Travaux de M. Joessel.* — Les difficultés que l'on rencontrait au début, à faire fonctionner régulièrement les chaudières Belleville, conduisirent à rechercher des dispositions différentes pour résoudre le même problème. Les défauts les plus manifestes étaient l'insuffisance de la circulation d'eau, qui permettait à la vapeur de s'accumuler dans les rangées inférieures de tubes, et l'absence de réservoir de vapeur, qui favorisait l'entraînement de particules liquides et qui rendait l'allure de la machine extrêmement irrégulière. Pour favoriser le mouvement de l'eau, on établit deux réservoirs verticaux en forme de lames, et l'on plaça entre eux un faisceau de tubes légèrement inclinés sur l'horizon courant simplement d'une lame à l'autre; on réalisait ainsi une portion de la chaudière Martin-Cochrane renversée. L'appareil ainsi constitué fut surmonté d'un réservoir de vapeur cylindrique, dans lequel fut placé en général le niveau d'eau. Tel est le type générique des chaudières à circulation libre.

Un modèle de ce genre fut construit à Indret en 1869 par M. Joessel, l'ingénieur bien connu qui avait commencé dès 1862, sur une chaudière lenticulaire, l'étude des effets du chauffage de l'eau d'alimentation et de la surchauffe de la vapeur. La chaudière de 1869 était curieuse; le réservoir supérieur très volumineux formait lui-même une véritable chaudière; le faisceau tubuleux présentait cette particularité, que les tubes d'eau étaient traversés par des tubes de fumée concentriques de manière à offrir double surface de chauffe. La fumée, après s'être élevée entre les deux lames de tête, traversait l'une d'elles par des entretoises creuses; elle rentrait ensuite dans les tubes intérieurs, pour retraverser toute la chaudière et se rendre à la boîte à fumée placée à l'extérieur

de la seconde lame (fig. 146), à peu près comme dans la chaudière qu sera décrite au n° 121. Ainsi, on était allé, du premier coup, au modèle le plus compliqué, comme cela arrive souvent. Cette chaudière est restée longtemps en service, sur un canot à vapeur qui naviguait entre Indret et Nantes.

Chaudière du Piston, et chaudière d'atelier.

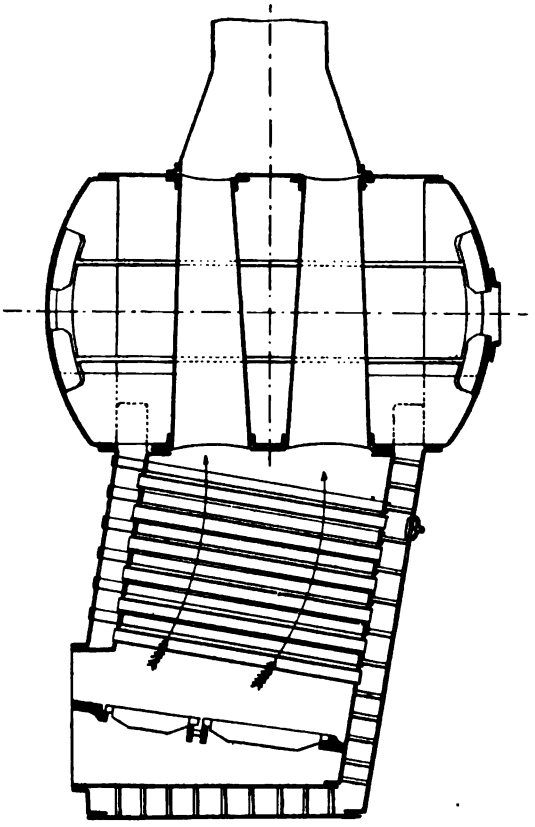


Fig. 120

Poursuivant ses recherches, M. Joessel simplifia bientôt son appareil par la suppression du retour de flamme à l'intérieur des tubes. Un projet en ce sens, proposé en septembre 1871, fut rejeté; un autre fut approuvé en 1874 pour la chaudière du remorqueur le *Piston*, puis, l'année suivante, pour celles des avisos *Actif* et *Argus*; toutes ces chaudières firent un service actif avec un fonctionnement régulier. La figure 120 représente une chaudière d'atelier à plusieurs corps construite en 1875; l'un des corps a été réparé en 1888 pour une chaloupe à vapeur et sert probablement encore. Les lames tètières étaient fortement entretoisées, et pré-

sentaient, en face de chaque tube, un petit trou d'homme pour la mise en place et le mandrinage, plus tard la visite et le nettoyage du tube. Ce sont les dispositions de la plupart des modèles qui se sont succédé depuis lors. Le réservoir de vapeur était d'un très grand volume et était traversé par de gros tubes de fumée. La lame d'eau arrière présentait, à la partie inférieure, un prolongement formant la sole du cendrier, et compliquait ainsi la construction sans grande utilité.

Les difficultés pratiques de construction et de conduite paraissaient résolues; un projet de chaudières fut même demandé pour le *Colbert* alors en construction: mais l'inventeur, ne jugeant pas son œuvre assez parfaite déconseilla cette grande application. M. Joessel reprochait surtout à sa chaudière l'imperfection de la combustion, due, comme sur la chaudière Belleville, à l'insuffisance de hauteur entre la grille et les tubes, et au refroidissement prématuré de la flamme qui en est la conséquence. Il déclarait indispensable l'établissement d'une chambre de combustion avant l'arrivée aux tubes; mais il ne réalisa pas cette dernière conception; son expérience de la conduite des chaudières lui faisait mesurer d'ailleurs toutes les difficultés du problème, aussi bien que son importance. Comme du reste M. Joessel, pour le plus grand dommage de la marine, ne prenait jamais de brevets, il est assez difficile d'établir, après vingt ans, sa part exacte, dans l'invention et le perfectionnement des chaudières à deux lames de tête; on sait seulement qu'elle fut grande et, pendant quelques années, prédominante.

106. — *Chaudière Penelle.* — Cette chaudière, introduite vers 1874 sur les canots à vapeur de la flotte, est une chaudière Joessel, sur laquelle les deux parois extérieures des lames têtières sont des calottes sphériques, ce qui permet de se passer d'entretoises. Les calottes sphériques des têtières forment à leur partie supérieure les deux fonds du réservoir de vapeur, dont l'enveloppe relie, à sa partie inférieure, les tôles intérieures des deux têtières.

L'absence de trous d'hommes pour la mise en place et la visite des tubes est une source de difficultés. La chaudière Penelle a été abandonnée après une vogue de plusieurs années.

107. — *Chaudière Oriolle.* — Parmi les modèles actuellement en service, la chaudière Oriolle est celle qui réalise le plus exactement l'une des anciennes conceptions de M. Joessel, dont elle représente surtout l'application spéciale aux torpilleurs. La chaudière Oriolle a été adoptée avec succès, sur les bateaux à vapeur de la Loire exclusivement chauffés

au coke pour éviter toute fumée. L'emploi des combustibles à très courte flamme écarte en effet les inconvénients dus à l'insuffisance de la chambre de combustion. Nous allons décrire immédiatement cette chaudière, dont l'emploi est resté très limité, avant d'aborder l'étude des autres modèles à circulation libre, dont quelques-uns sont contemporains des modèles Joessel de 1870-1872.

Dans la chaudière Oriolle, la flamme s'élève directement à travers les tubes qu'elle rencontre à une hauteur de $0^{m},70$ environ au-dessus de la grille; deux files verticales de tubes descendent de chaque côté de la grille, en encadrant le foyer. La combustion se fait assez bien pour avoir permis, sur quelques torpilleurs, d'employer des tirages forcés énergiques et de brûler jusqu'à 300 kilogrammes de charbon par mètre carré de grilles; mais la production de fumée, redoutée par M. Joessel, est alors abondante, et le panache qui surmonte la cheminée signale au loin la présence des torpilleurs. M. Oriolle a tenté, sans succès, de se débarrasser de la fumée, par un lavage dans une sorte d'injecteur d'eau placé dans la base de la cheminée.

Chaudière Oriolle. (*Torpilleurs 161 à 163*)

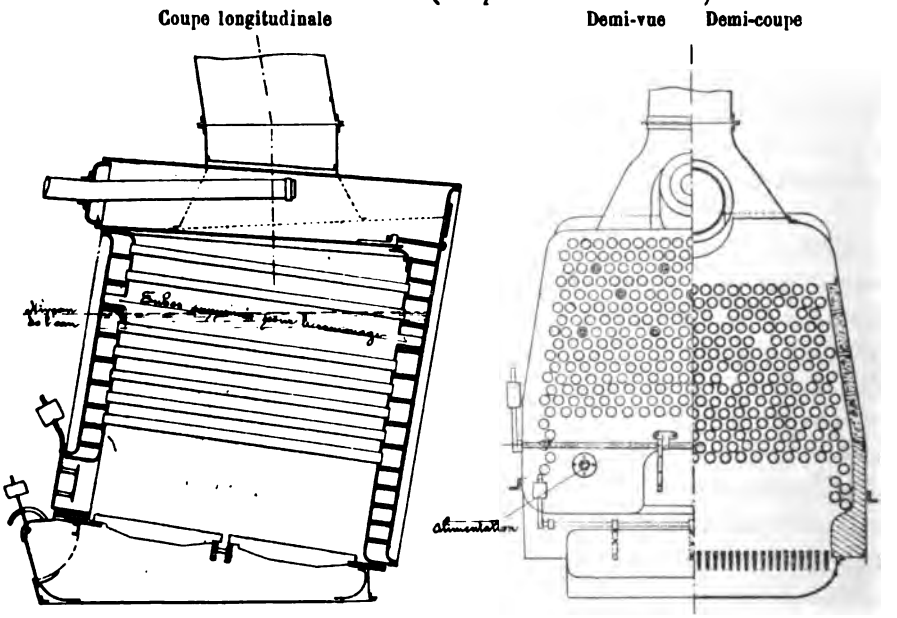


Fig. 121 — Fig. 121 *bis*

◎ Tubes supprimés pour le ramonage.

Le niveau de l'eau est dans les tubes; sur vingt rangées de tubes en tout, les quatre ou cinq rangées supérieures sont entièrement remplies de vapeur et les trois ou quatre suivantes, en partie d'eau et en partie

de vapeur, en raison de leur inclinaison. Un réservoir cylindrique, formant coffre à vapeur, est placé au-dessus de la tôtière arrière, tantôt parallèlement à la façade et en dehors du courant de flamme, comme sur le *Lansquenet*, tantôt perpendiculairement, comme sur les torpilleurs 75 à 81, 83 à 86 et 161 à 163 (fig. 121), mais toujours sans communication avec la lame d'eau avant.

Sur le *Lansquenet*, les tubes ont 41 millimètres seulement de diamètre intérieur et 2 millimètres d'épaisseur, ce qui permet d'avoir une surface de chauffe tubulaire de 39 fois la surface de grilles et une surface de chauffe totale de 43 fois environ cette surface.

Les tubes sont simplement tenus dans les plaques par un mandrinage; l'appareil Dudgeon, seul employé au début, a été abandonné pour le procédé Caraman. Il n'y a pas de trous de visite permettant de mettre les tubes en place et de les visiter, sans démonter, ou plutôt sans démolir, toute la lame d'eau. Les lames d'eau sont simplement consolidées par des entretoises; elles sont traversées par des canons creux destinés au ramonage à la vapeur, qui entraînent la suppression d'un tube sur douze environ.

Les premières chaudières Oriolle ont été installées vers 1890 sur les torpilleurs 75, 80, 81, 83, 84 et y ont fait trois ans de service sans réparation. En 1893, on a dû changer à peu près complètement les tubes de vapeur, les tubes d'eau pouvant encore être conservés. Les piqûres, qui avaient amené la mise hors de service et parfois la perforation des tubes de vapeur, s'étaient produites sous des dépôts tartreux provenant de l'introduction évidente de l'eau de mer pour réparation des pertes; ce fut l'occasion de l'étude de M. Haas au sujet de la formation de l'acide chlorhydrique, dont il a été question au n° 76.

Les chaudières Oriolle paraissent en somme capables de faire un service suffisamment prolongé pour des appareils de torpilleurs. On les a installées récemment sur le *Zouave*, le *Turco*, le *Doudart-de-Lagrée* et sur les torpilleurs 161, 162, 163. Les meilleures expériences relatives au rendement des chaudières Oriolle sont les essais de vitesse de ces derniers torpilleurs. Les chaudières ont $4^{m^2},5$ de surface de grilles; elles ont permis d'atteindre des vitesses un peu supérieures à 21 nœuds, en brûlant environ 300 kilogrammes de charbon par mètre carré de grilles. La puissance développée n'a pas été mesurée, mais on peut la déduire des données relevées sur les bases, en supposant les puissances proportionnelles au cube des vitesses; on forme ainsi le tableau suivant :

NUMÉRO DU TORPILLEUR	161	162	163
Combustion par mètre carré de grilles .	304k.	284k.	306k.
Puissance totale correspondante	1147ch.	1250ch.	1097ch.
Consommation par cheval.	1k,19	1k,02	1k,29

Les chaudières du *Lansquenet* n'ont pu subir jusqu'ici d'essais, en raison des avaries de la machine, qui n'ont aucune relation d'ailleurs avec le système des chaudières.

La chaudière Oriolle est remarquablement légère, son poids total, eau et accessoires compris est, suivant M. de Maupeou, de 2tx,80 seulement par mètre carré de grilles.

MM. Brosse et Fouché ont fait breveter une chaudière, qui est en beaucoup de points semblable à la chaudière Oriolle : le niveau de l'eau est dans les tubes, mais beaucoup plus près du coffre de vapeur ; le faisceau de tubes est divisé en deux parties : les tubes inférieurs ont (50 millimètres $+ 2 \times 2^{mm},5) = 55$ millimètres de diamètre extérieur ; les tubes supérieurs ont $(40 + 2 \times 2,5) = 45$ millimètres ; une cornière écran, placée dans la lame de tête, fait passer sur les côtés la vapeur qui se dégage du faisceau inférieur afin de laisser libre le dégagement de la vapeur du faisceau supérieur. Un écran semblable est placé dans la lame d'eau arrière. Une autre innovation par rapport à la chaudière Oriolle est le dégagement direct, dans le coffre, de la vapeur de la lame de tête, et le retour de l'eau à la lame arrière par un gros tuyau analogue aux tubes de retour des chaudières type Du Temple.

108. — *Chaudière D'Allest. — Ses modèles successifs.* — Actuellement, le système à lames de tête est principalement représenté dans la marine par les chaudières D'Allest, qui sont à peu près contemporaines des premières chaudières Joessel, et qui se rattachent au brevet Barret et Lagrafel du 18 mai 1870 avec additions du 17 mai 1871 et du 24 février 1872, et au brevet Lagrafel et D'Allest du 19 mars 1888. Dès le début, ces chaudières ont présenté les dispositions du modèle D'Allest actuel, sauf en ce qui concerne le mouvement des gaz chauds. Dans le premier modèle, les gaz faisaient deux parcours horizontaux à travers le faisceau de tubes ; un écran en briques était établi à cet effet à peu près au tiers de la hauteur du faisceau (fig. 122). En 1871, l'écran horizontal fut remplacé par un écran vertical en briques établi au-dessus de l'autel, qui faisait faire au gaz deux parcours verticaux (fig. 123). Enfin en 1872, on re-

vint aux écrans horizontaux, mais en établissant deux cloisons de briques, l'une immédiatement au-dessus du foyer, la seconde aux deux tiers de la hauteur du faisceau (fig. 124). Cette dernière disposition était de nature à améliorer la combustion du charbon sur la partie antérieure des grilles.

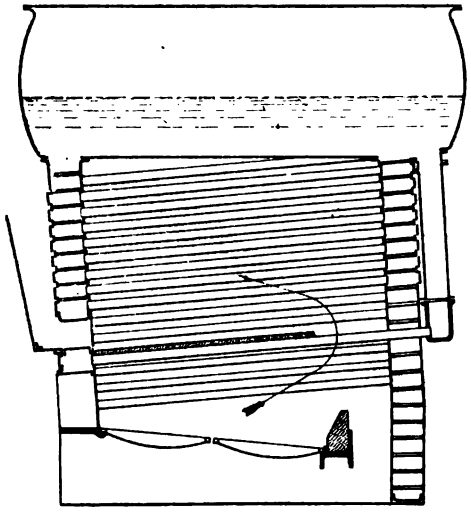


Fig. 122

En général, on s'était préoccupé, dans toutes les études d'écrans qui précèdent, d'utiliser la chaleur des gaz, beaucoup plus que d'obtenir une parfaite combustion. La disposition du modèle breveté en 1888, que nous avons principalement à considérer, est, au contraire, destinée à réaliser une bonne combustion, s'accomplissant dans une boîte à feu distincte de la boîte à tubes.

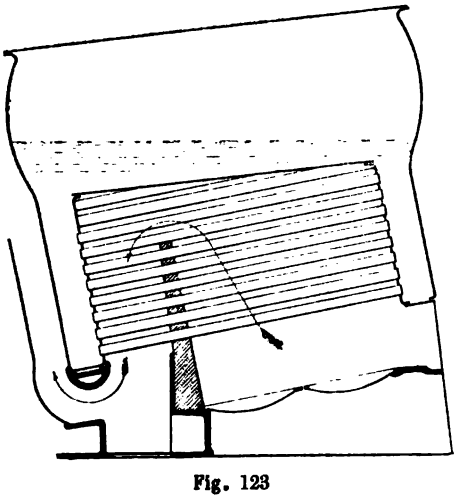


Fig. 123

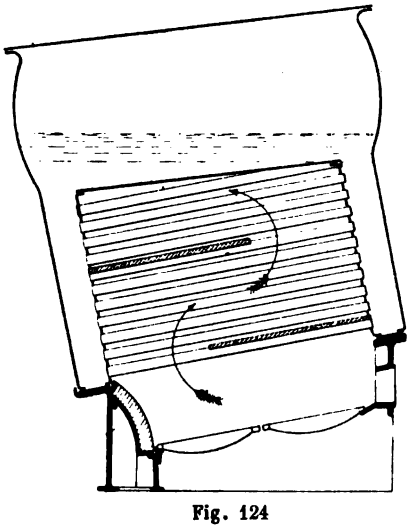


Fig. 124

La chaudière Barret et Lagrafel a été installée en 1871 sur l'*Isère*, en 1873 sur le *Blidah* et le *Médéah*, puis plus tard sur le *Paoli*, le *Spahi*, le *Colon*, le *Kabyle* et d'autres paquebots de la Compagnie Fraissinet. Le modèle D'Allest de 1888 a fait son apparition en 1891 sur le *Liban* et le *Don-Pedro*; à la suite des essais de ces paquebots, il a été adopté par

la Marine de guerre qui en fait actuellement une très large application. C'est le seul modèle auquel nous nous arrêterons. On le rencontre sur la *Bombe*, le *d'Iberville*, le *Bouvines*, le *Jemmapes*, le *Jauréguiberry*, le *Carnot*, le *Charles-Martel*, le *Masséna*, la *Foudre*, le *Chasseloup-Laubat*, le *d'Assas*, le *Cassini*, le *Casabianca* et le *Guichen*.

Guichen

Chaudière Lagrafel et D'Allest.

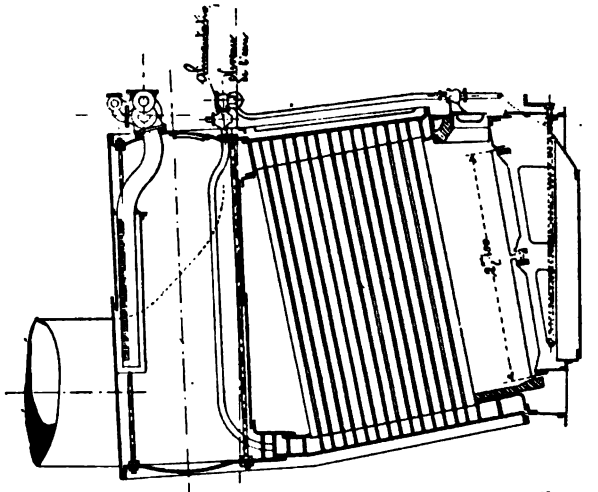


Fig. 125 *bis*

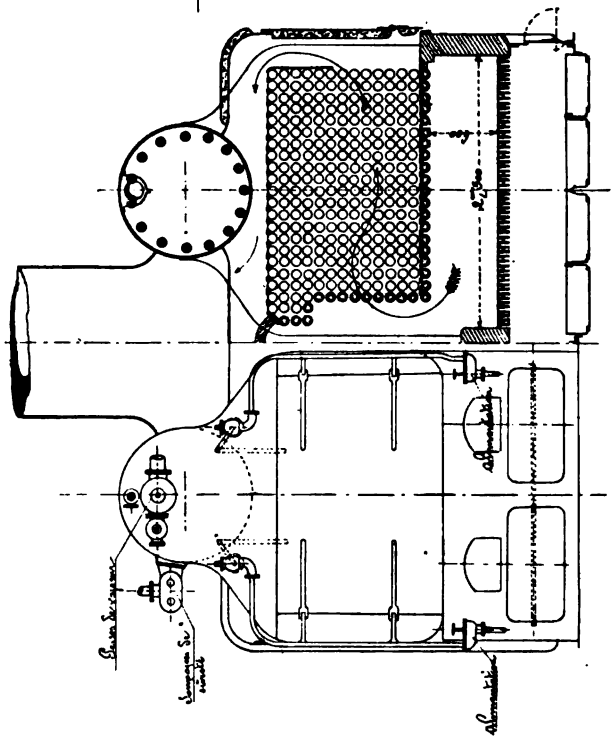


Fig. 125

109. — *Dispositions générales. — Encombrement.* — Les lames d'eau de tête ou têtières et le faisceau de tubes qui les réunit sont légèrement inclinés vers l'arrière, de manière à diriger le courant de vapeur vers la têtière avant (fig. 125). Le brevet prévoit l'emploi de tubes courbes, avec point d'inflexion au milieu de la longueur, venant s'appliquer normalement sur des têtières verticales ; cette disposition, imaginée surtout pour faciliter la dilatation des tubes, n'a pas eu d'applications dans la pratique. Un grand réservoir cylindrique surmonte la chaudière, en allant d'une têtière à l'autre ; le niveau de l'eau normal est dans ce réservoir. Le réservoir cylindrique sert principalement de coffre à vapeur et d'épurateur de vapeur.

La boîte à feu, qui constitue la partie caractéristique du modèle D'Allest 1888, est située sur le côté de la grille. Un écran, composé de briques placées sur la rangée inférieure de tubes, rabat la flamme latéralement; les gaz reviennent à travers le faisceau, en suivant à peu près le même parcours que dans une chaudière tubulaire à retour de flamme, et sortent à la partie inférieure pour se rendre dans une boîte à fumée située à l'opposé de la boîte à feu. Tout l'espace occupé par le faisceau tubulaire et la boîte à feu est fermé à la partie supérieure par un second écran reposant sur la rangée supérieure de tubes. Au-dessous de cet écran supérieur, quelques rangées horizontales de tubes sont conservées dans la boîte à feu, pour empêcher celle-ci de s'élever jusqu'à la partie haute du faisceau tubulaire.

Cette disposition du courant de flamme, très favorable au rendement de la chaudière présente un danger très apparent, dont les accidents successifs du *Liban* en 1890, puis du *Don-Pedro*, enfin du *Jauréguiberry* en 1896 ont prouvé la gravité. La partie la plus chaude des gaz de la combustion frappe des tubes très élevés, toujours moins bien rafraîchis que ceux du bas par la circulation, et parfois exposés, soit à se remplir de chambres de vapeur, soit même à manquer d'eau, par suite d'un abaissement accidentel du niveau. Dès l'accident du *Liban*, on a reconnu la nécessité de diminuer la hauteur de la boîte à feu, en conservant dans le haut quatre rangées horizontales de tubes complètes, tandis qu'il n'y en avait primitivement que deux (fig. 126 et 127).

Chaque chaudière est double avec deux foyers, deux faisceaux de tubes, deux réservoirs et une boîte à feu unique placée au centre, desservant les deux foyers ; la grande longueur de cette boîte à feu, égale à la longueur de la grille, permet de la réduire beaucoup dans le sens transversal, en la proportionnant à la largeur de la grille seulement. La disposition de la boîte à feu a varié dans ces derniers temps, comme le représentent les deux figures 126 et 127 relatives la première aux chau-

dières de la *Bombe*, la seconde à celles du *d'Iberville*. On s'était d'abord préoccupé d'opérer plus complètement le rabattement et le brassage des gaz; on s'est ensuite attaché surtout à diminuer l'encombrement horizontal de la chaudière. Sur la *Bombe*, le rapport de la projection horizontale de la chaudière à la surface de grilles est de 2,06; sur le *d'Iberville*, il descend à 1,48, chiffre inférieur à celui des chaudières Belleville.

Bombe

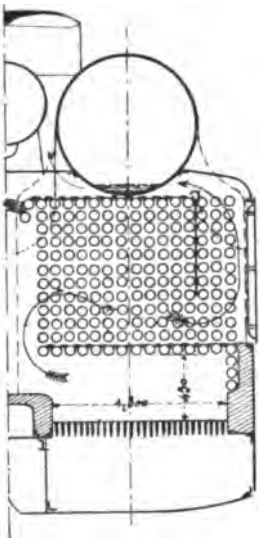


Fig. 126

D'Iberville

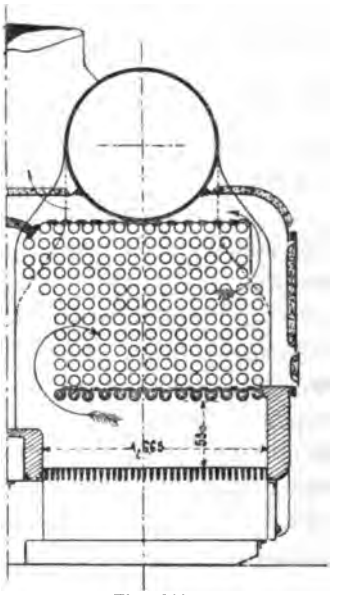


Fig. 127

Dans le sens de la hauteur, l'encombrement des chaudières D'Allest est de $3^m,90$ environ, pour treize rangées horizontales de tubes, et de $3^m,80$ pour douze rangées ; ce sont les dimensions usuelles assez rarement dépassées.

La surface de chauffe tubulaire atteint, sur le *Jemmapes* par exemple, 31,5 fois la surface de grilles, et la surface de chauffe totale 33,5 fois la surface de grilles.

110. — *Détails de construction de la chaudière D'Allest.* — Comme détails de construction, les chaudières D'Allest ont peu varié ; elles sont simples ; il n'y a pas d'accessoires particuliers.

Afin de prévenir le cintrage des tubes, on a, à la suite des premiers essais de la *Bombe*, adopté les tubes Serve pour la rangée inferieure et pour la première file verticale de tubes du côté de la boite à feu. Dès les premières chauffes, les tubes inférieurs de la *Bombe* avaient gardé un arc permanent atteignant jusqu'à 10 millimètres, la convexité étant

tournée vers le haut, ainsi qu'il arrive aux pièces de fer très inégalement chauffées sur leurs deux faces (fig. 102) ; c'était là une trace de fatigue, qui, se manifestant dès le début, était inquiétante pour la durée des appareils et surtout la bonne tenue des joints.

Les tubes sont en fer, de 80 millimètres de diamètre extérieur et de 3 millimètres d'épaisseur ; ils se fixent par un simple mandrinage. Les tubes sans soudure sont adoptés exclusivement, depuis la déchirure d'un tube mal soudé sur le *Jauréguiberry*.

Les têtières sont fortement entretoisées et munies de petits trous d'homme en face de chaque tube.

Après divers essais, on a adopté à Indret deux sortes de garnitures pour les autoclaves des petits trous d'homme ; les unes sont en amiante avec feuilles de métal (fig. 128), les autres entièrement métalliques (fig. 129). Les garnitures d'amiante sont serrées entre deux lames de

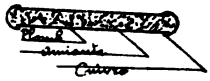


Fig. 128

Fig. 129

plomb et deux demi-tores en cuivre mince ; les garnitures métalliques sont formées de deux rondelles de plomb séparées par une rondelle de cuivre ; le tout forme un ensemble qui se tient, s'enlève et se met en place d'une seule pièce.

Le réservoir cylindrique est fortement découpé, sur le demi-pourtour inférieur, par les deux lames de tête ; ses deux fonds sont réunis l'un à l'autre par une couronne de tirants longitudinaux. Ce réservoir est muni intérieurement d'une cloison recourbée, qui isole la prise de la vapeur du niveau de l'eau et constitue dans ce réservoir une sorte d'épurateur partiel, genre Belleville, très simplifié ; cette disposition a été prise à la suite des essais de la *Bombe*, dont les chaudières donnaient de la vapeur très humide.

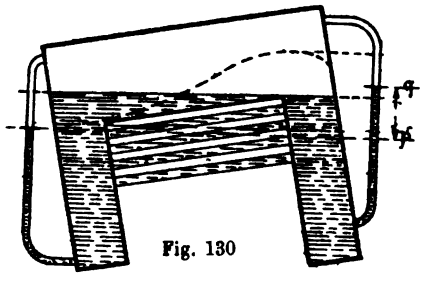


Fig. 130

L'alimentation se fait dans la lame d'eau arrière ainsi que l'on voit sur la figure 125 *bis*, qui se rapporte au *Guichen*.

Le dégagement de la vapeur, qui se produit tout entier sur la têtière avant, sur le navire au repos, produit un mouvement d'eau tumultueux dans cette têtière et une forte intumescence dans le réservoir, tandis que l'eau reste calme dans la têtière arrière. De là une déformation très importante du niveau, qui varie avec l'intensité de la chauffe, et qui est

représentée, figure 130, d'après les observations faites dans une chaudière d'essai munie de glaces. Entre les niveaux, dans deux tubes placés sur les deux têtières, on observe une différence $p\,q$, qui varie moins que la hauteur de l'intumescence, et qui oscille généralement entre 6 et 7 centimètres. Comme le niveau est beaucoup plus stable dans un tube communiquant avec la têtière arrière, c'est à la partie inférieure de cette têtière que l'on envoie le tuyau inférieur de la clarinette du niveau d'eau, depuis l'accident survenu sur le *Liban* en 1890.

L'adoption d'une cheville fusible dans la rangée supérieure de tubes a été décidée pour la chaudière marine, à la suite de l'acccident du *Liban*; mais la connaissance plus exacte de la variation des niveaux, la disposition donnée à la prise d'eau de la clarinette et les autres améliorations de détail n'ont pas laissé conserver, à cette précaution supplémentaire, l'importance qui lui était attribuée au début. Il ne semble pas que les chaudières du *Jauréguiberry*, en particulier, aient reçu de chevilles fusibles.

La vapeur, sur le parcours de la chaudière à la machine, traverse un détendeur.

111. — *Résultats obtenus.* — Les expériences faites à Marseille sur des chaudières d'essai ont donné les résultats suivants :

CHARBON BRULÉ par heure et par mètre carré de grilles	EAU VAPORISÉE PAR KILOGRAMME DE CHARBON	
	ANCIEN MODÈLE (sans chambre de combustion	NOUVEAU MODÈLE (avec chambre de combustion)
40 kil.	»	40^{lit},67
75 »	6^{lit},06	10 ,42
100 »	6 ,53	»
122 »	»	8 ,02
151 »	»	8 ,75

La grande supériorité du nouveau modèle est due, pour une petite part, à ce que les gaz sont mieux dépouillés de leur chaleur; la température à la base de la cheminée a été, en effet, dans les essais, de 300 degrés avec la chaudière ancien modèle munie de deux écrans horizontaux, et de 250 degrés avec la chaudière nouveau modèle. Sa cause principale est dans la perfection plus grande de la combustion, comme le montre l'analyse des gaz faite avec l'appareil Orsat. Anciennement il se dégageait de l'oxyde de carbone, en telle abondance, que M. D'Allest a pu croire à une décomposition de l'acide carbonique au

contact des tubes froids, selon la réaction simple, mais peu vraisemblable,

$$CO^2 = O + CO.$$

Sur le nouveau modèle, l'oxyde de carbone a été trouvé en proportion faible au-dessus de l'autel et tout à fait inappréciable dans la boîte à fumée.

La substitution des chaudières D'Allest aux chaudières locomotives sur la *Bombe* a donné des résultats favorables. Les deux appareils avaient même poids total, avec des surfaces de grilles notablement différentes, $7^{m2},20$ pour les anciennes chaudières locomotives et $9^{m2},36$ pour les nouvelles chaudières D'Allest. Les anciennes chaudières n'avaient pu faire donner que 1.323 chevaux au maximum, en brûlant $1^k,284$ par cheval ; le tableau ci-après montre que les nouvelles chaudières ont été notablement plus économiques, pour une puissance développée de 1.985 chevaux.

Plusieurs appareils moteurs munis de chaudières D'Allest ont jusqu'ici fait leurs essais, la *Bombe* dont la machine est à double détente, le *Jemmapes*, le *Chasseloup-Laubat*, le *Bouvines*, le *d'Iberville*, le *Cassini*, le *Casabianca*, le *Jauréguiberry*, le *Carnot*, le *Charles-Martel*, qui sont à triple détente ; voici quelques-uns des résultats obtenus :

	Bombe	Cassini	Chasseloup-Laubat	Jemmapes
1° — ESSAI DE CONSOMMATION				
Pression aux chaudières	$8^k,80$	$11^k,50$	$12^k,06$	$11^k,20$
d° aux détendeurs	$8^k,058$	$10^k,62$	$9^k,532$	$11^k,74$
Détente de la machine $\Delta = \frac{D^2}{i\,d^2}$	4,39	8,6	12,59	11,86
Charbon brûlé par m² de grille	$102^k,9$	$98^k,22$	$52^k,98$	$71^k,852$
Charbon brûlé par cheval	$0^k,936$	$0^k,813$	$0^k,662$	$0^k,895$
2° — ESSAI DE VITESSE				
Pression aux chaudières	$9^k,825$	$13^k,75$	$13^k,00$	$14^k,88$
d° aux détendeurs	$8^k,400$	$12^k,09$	$11^k,241$	$12^k,999$
Détente de la machine $\Delta = \frac{D^2}{i\,d^2}$	3,78	6,84	7,34	8,763
Charbon brûlé par m² de grille	$235^k,6$	$152^k,7$	$116^k,6$	$147^k,083$
Charbon brûlé par cheval	$1^k,062$	$0^k,872$	$0^k,796$	$0^k,940$

L'épreuve du service courant, déjà faite sur les paquebots de la Compagnie Fraissinet pour des chauffes modérées et très régulières, ne peut pas encore être considérée comme réalisée sur les bâtiments de guerre. Les chaudières de la *Bombe* seules comptent quelques années de service. Dans la visite faite en 1894, on a trouvé les tubes inférieurs cintrés, comme l'avaient été en 1891 ceux de la chaudière essayée à terre; mais il n'était résulté de là aucun accident. Tous les tubes s'arquent en fuyant la flamme, suivant le principe de la figure 102. Les tubes ont de plus une tendance à s'user intérieurement près de l'emmanchement, comme l'indique la figure 131; en deux ans, on a remplacé 70 tubes des chaudières de la *Bombe*, par suite de ce genre d'usure.

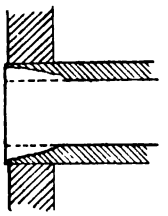


Fig. 131

Le grave accident, qui a fait six victimes au cours des essais de recette du *Jauréguiberry*, a rappelé d'une manière sinistre la surveillance particulièrement minutieuse des niveaux, qui est nécessaire, sur la chaudière D'Allest, en raison de la boîte à feu.

Un tube en fer mal soudé, ou même non soudé, qui avait subi cependant de sévères épreuves, s'est ouvert, dans la file verticale contiguë à la boîte à feu, sur la dixième rangée horizontale à partir du haut. Comme on n'avait à ce moment, ni une combustion très active, ni une pression très élevée, l'occasion du coup de feu qui a provoqué l'accident était évidemment dans un abaissement anormal du niveau. Sans doute, le niveau n'était pas descendu jusqu'à la dixième rangée de tubes, loin de là; mais il suffisait que la circulation normale eut cessé dans le réservoir et que le retour de l'eau à la têtière arrière se fit par les tubes supérieurs, pour qu'il y eut stagnation, formation de chambres de vapeur, échauffement violent sur certaines rangées, parmi lesquelles celle qui contenait le tube défectueux.

112. — *Chaudière Seaton* (premier modèle). — La chaudière Seaton (fig. 132) présente de grandes analogies avec la chaudière D'Allest; les différences sont les suivantes:

Le faisceau de tubes est divisé en grands éléments, comprenant chacun quatre ou cinq files verticales de tubes horizontaux avec deux lames de tête et un réservoir cylindrique, et composant ainsi une sorte de chaudière D'Allest très amincie. Tous les collecteurs partiels sont réunis par un grand collecteur transversal servant de coffre à vapeur commun.

La faible largeur des lames d'eau permet de se passer d'entretoises. Les tôles extérieures présentent des ondulations, qui leur tiennent lieu

d'armatures; ces tôles sont démontables, ce qui permet la suppression des petites portes de visite en face des tubes.

Le réservoir général de vapeur a l'inconvénient d'accroître notablement la hauteur de l'appareil.

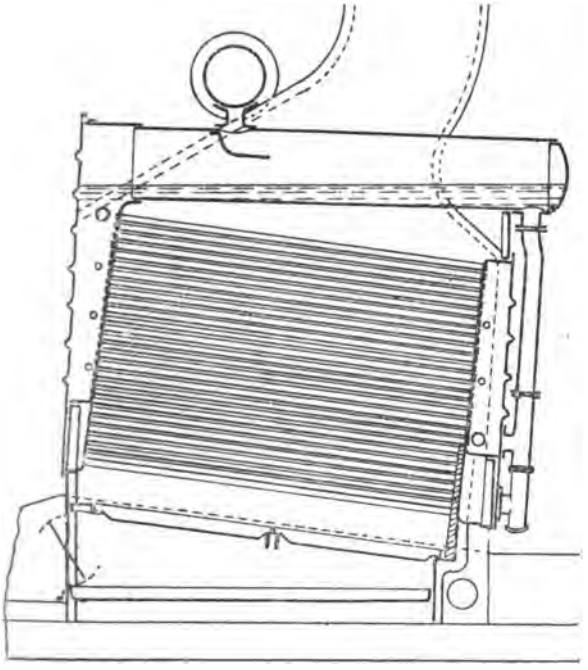


Fig. 132

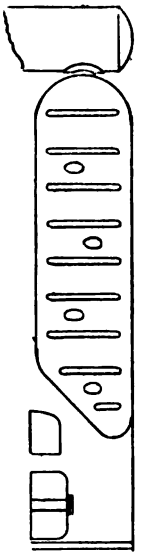


Fig. 132 *ter*

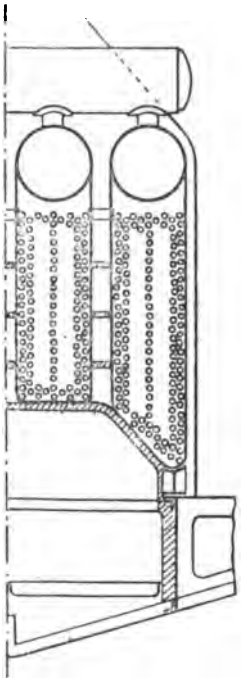


Fig. 132 *bis*

113. — *Chaudière Babcock* et *Wilcox.* — La chaudière Babcock et Wilcox est une des plus anciennes parmi les chaudières tubuleuses; elle est très répandue en Amérique, et présente un grand nombre de modèles variés. Elle a été presqu'uniquement employée à terre, jusqu'à présent, ce qui conduit à ne lui accorder ici qu'une assez brève mention. La figure 133 représente le modèle marin le plus récent, qui a été établi sur des cargos.

La circulation de l'eau est à peu près celle des chaudières D'Allest, mais les lames tètières sont remplacées par une série de canaux rectangulaires en acier forgé, dont le profil vertical est sinueux, pour placer les tubes en quinconce et les faire contourner tous par les flammes; les deux rangées latérales de tubes, seules, sont disposées verticalement afin de protéger l'enveloppe.

Les flammes s'élèvent verticalement à travers le faisceau tubulaire. Les tubes des rangées inférieures, gros et espacés, laissent la combus-

tion s'achever; les tubes des rangées supérieures, petits et resserrés, dépouillent les gaz de leur chaleur. Un réchauffeur d'alimentation est placé à la base de la cheminée.

Chaudière Babcock et Wilcox

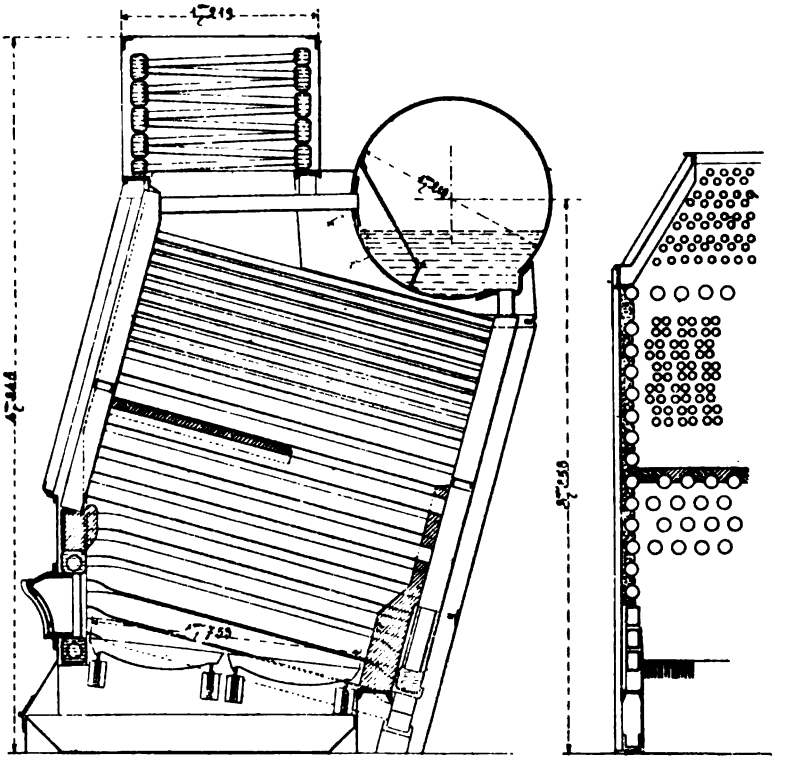


Fig. 133 Fig. 133 *bis*

La chaudière Babcock et Wilcox a été installée sur les navires *Nero* et *Hero* de la ligne Wilson, sur trois bâtiments construits par MM. Doxford de Sunderland, enfin sur le navire français l'*Algérie* de 1.282 tonneaux. Elle n'a jamais été essayée qu'au tirage naturel à bord de ces bâtiments. En 1895, on a fait à terre un essai au tirage forcé en vase clos, sur un appareil du même type que celui de l'*Algérie*, dont les données sont les suivantes :

Surface de grilles	G =	3m²,58
Surface de chauffe	S =	144m²,18
Rapport	$\frac{S}{G}$ =	40,2.

L'essai a duré 24 heures ; on brûlait du charbon de Pacahontas; les résultats ont été :

Pression d'air dans le cendrier	25mm,4
Tirage dans la cheminée.	12mm,7
Tirage total.	38mm,1
Vaporisation par mètre carré de surface de chauffe.	46k,38
Vaporisation par kilogramme de charbon. . . .	7 kilog.

ce qui fait une évaporation de 8k,75, pour de l'eau prise chaude à 100°, et vaporisée à 100°.

Les applications à la marine de guerre de la chaudière Babcock et Wilcox ont été limitées aux *Torpedo-catchers*, *Swordfish* et *Spitfire*, construits par la maison Mitchell et Cie d'Elswick.

114. — *Chaudière Anderson et Lyall.* — La chaudière Anderson et Lyall, figure 134, est mi-partie tubuleuse et mi-partie tubulaire. Elle se compose en effet de deux parties distinctes. La partie inférieure est une sorte de chaudière Joessel, à tubes très largement espacés, que les flammes traversent sans se refroidir beaucoup, de manière à arriver à une combustion parfaite. La partie supérieure est une chaudière cylindrique complète, du modèle assez longtemps employé sur nos canots

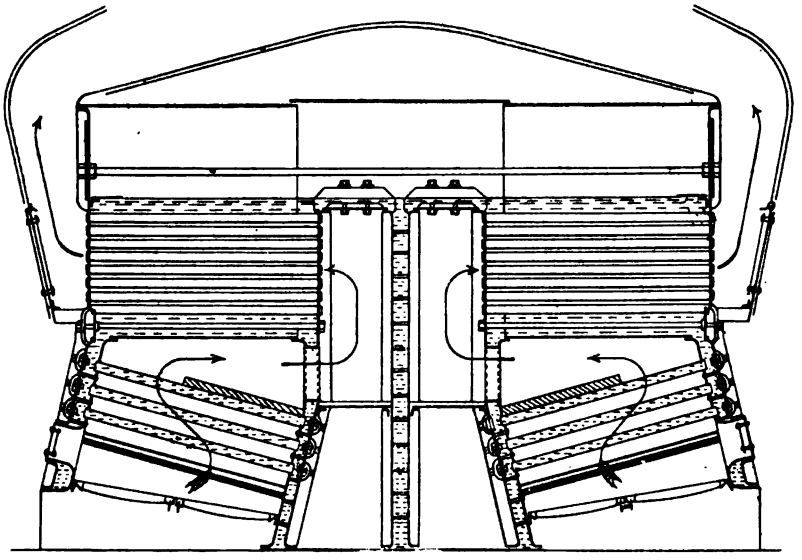


Fig. 134

à vapeur, sous le nom de chaudière Bigot, dans laquelle les gaz achèvent de se dépouiller de leur vapeur. Des lames d'eau verticales réunissent les deux parties. Le modèle représenté figure 134 est à double façade.

M. Stromeyer, qui a expérimenté cet appareil, l'a trouvé supérieur à toutes les autres chaudières tubuleuses, sous le rapport du rendement calorifique. Il a calculé que le nombre de calories utilisées s'élève à 7.672, avec un combustible qui en donne 9.532, ce qui correspond à un rendement de 0,805. L'inconvénient de la chaudière Anderson et Lyall est dans son poids qui est de 6tx,36, eau comprise, par mètre carré de grilles. C'est à peu près le poids des chaudières type locomotive.

La hauteur totale est très grande, plus grande encore que celle de la chaudière Seaton.

114. — *Chaudière Towne.* — La chaudière Towne, qui est appliquée en Amérique sur les embarcations à vapeur et les canonnières, a deux lames têtières placées sur les côtés, et infléchies suivant un angle assez prononcé. Les tubes s'entrecroisent en allant de la partie inférieure d'une têtière à la partie supérieure de l'autre (fig. 135).

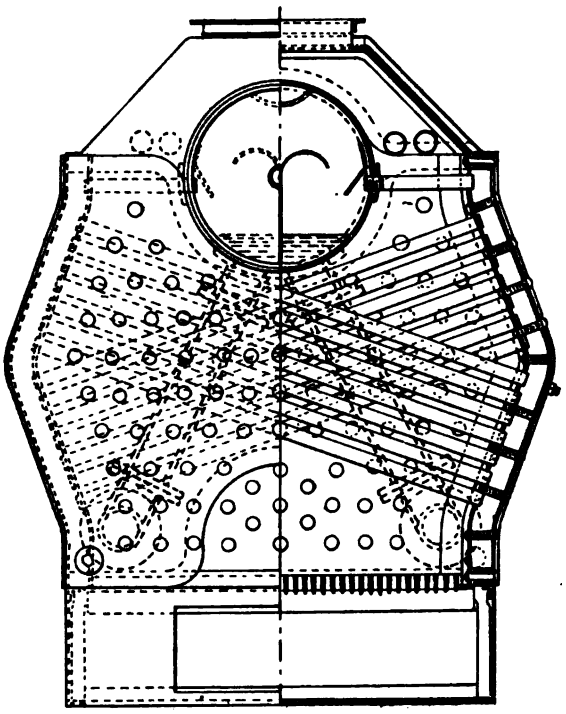


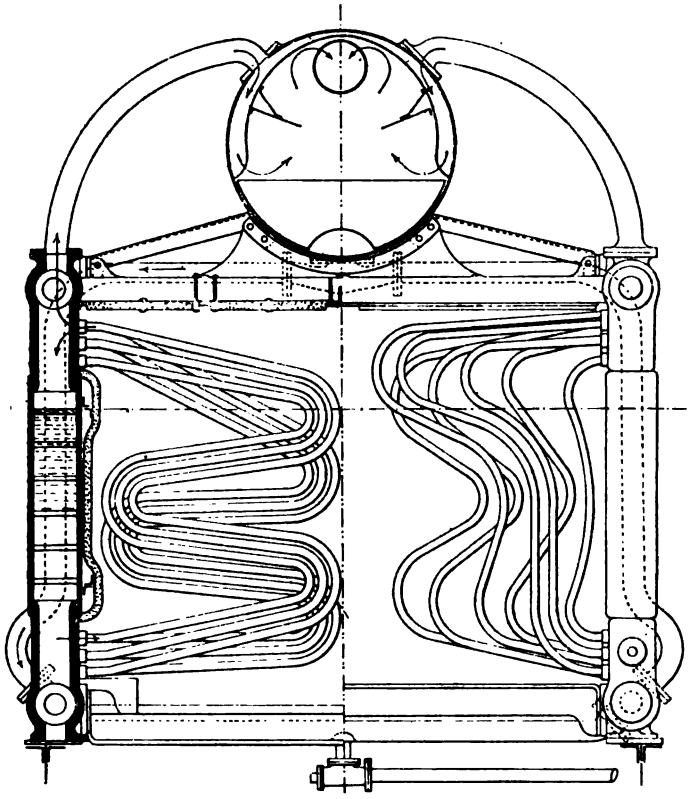
Fig. 25

Cette disposition originale permet de donner aux tubes une inclinaison favorable à la circulation, et augmente la hauteur du fourneau au-dessus de la grille, d'une manière favorable à la combustion.

La chaudière Towne présente des tubes de retour d'eau, qui la font

participer aux avantages des modèles à circulation accélérée, bien que ses dispositions générales soient plutôt celles des chaudières à circulation libre.

116. — *Chaudière Petit et Godard.* — La chaudière Petit et Godard est assez spéciale, et peut à peine se classer parmi les chaudières tubuleuses à circulation horizontale; l'eau y circule en effet dans des tubes courbés en zigzag dont les replis sont inclinés sur l'horizon. Il y a deux lames d'eau latérales et deux faisceaux de tubes, un pour chaque lame. Chaque lame sert de distributeur d'eau dans sa partie inférieure et de réceptacle de vapeur à sa partie supérieure (fig. 136).



Partie postérieure — Fig. 136 — Partie antérieure

La combustion du charbon s'opère dans un foyer placé sur l'avant du faisceau de tubes et simplement enveloppé de maçonnerie. Quand on marche au tirage forcé, la température s'élève beaucoup dans le foyer, et rend le service des chauffeurs difficiles.

La chaudière Petit et Godard, placée sur le torpilleur 73 et le *Bouët-Willaumez*, a été condamnée en principe à la suite d'essais assez

sommaires, dans lesquels on a trouvé que les tubes voisins du foyer étaient exposés à se brûler, sans doute par suite de la formation de chambres de vapeur, et que le service était incommode. Tranformée pour le chauffage au pétrole, elle est encore en service sur le *Bouët-Willaumez*.

Le principe même de la séparation du foyer et de la chaudière, pour produire la combustion complète à haute température dans une sorte de gazogène, est rationnel; il était préconisé du reste depuis longtemps. La chaudière Petit et Godard, à supposer qu'elle ne puisse pas fonctionner aux grands tirages forcés, défaut qu'elle partagerait d'ailleurs avec toutes les chaudières à circulation horizontale proprement dites, est peut-être un bon appareil de service courant à terre.

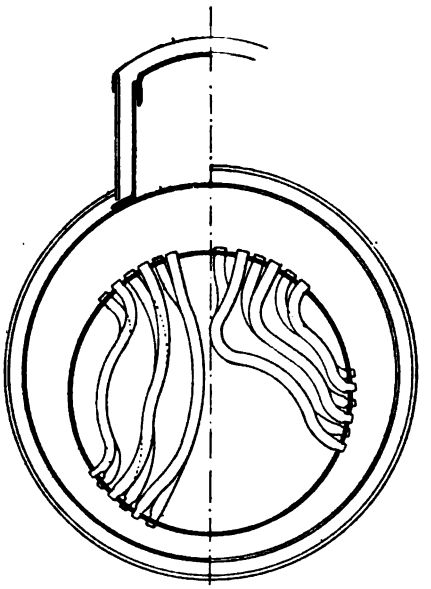


Fig. 137

Une chaudière, construite pour le torpilleur 21, et non embarquée sur ce bâtiment, sert à Brest dans un atelier.

On peut citer, comme chaudière présentant une certaine analogie avec la chaudière Petit et Godard, la chaudière cylindrique à foyer intérieur Leblond et Caville, qui est représentée figure 137, et qui est, à d'autres égards, un dérivé de la chaudière Galloway.

117. — *Chaudière Field.* — La chaudière Field, dont les tubes sont verticaux, doit d'abord être rappelée comme étant le prototype des modèles Collet et Niclausse, et de plusieurs modèles analogues.

Elle a été souvent employée à bord comme chaudière auxiliaire, surtout à l'époque où l'on ne connaissait guère que la chaudière Belleville pour rivaliser avec elle sous le rapport de la rapidité de mise en pression.

La figure 138 représente l'ensemble d'une chaudière de ce système et la figure 139 donne le détail d'un tube avec le sens de la circulation de l'eau.

Ce modèle, avec ses tubes verticaux débouchant dans un réservoir unique, est peu rationnel; le courant d'eau chaude et de vapeur sortant par l'anneau extérieur coupe l'accès de l'eau au tube intérieur, et la

CHAPITRE XVII

ACCESSOIRES RELATIFS A LA PRESSION ET AU MOUVEMENT DE LA VAPEUR

166. — *Manomètres. Soupapes avertisseuses.* — Les manomètres en usage sont des manomètres Bourdon; leur fonctionnement est simple; leurs indications sont toujours suffisamment exactes; leur installation n'exige d'autre soin que celui de l'éclairage et le choix de leur emplacement.

Il y a quelque intérêt à ce que l'arrivée de la pression à la valeur normale, qu'elle ne doit pas dépasser, soit automatiquement signalée dans la chambre de chauffe, où l'on n'a pas toujours l'œil sur les manomètres. Cet office est rempli par une petite soupape de sûreté, dite *soupape avertisseuse*, qui est placée sur la façade, et dont le tuyau d'échappement débouche dans la chambre de chauffe même. Dans la Marine française, l'orifice d'échappement de ces soupapes a 5 millimètres de diamètre seulement; le siège est plan; la charge est donnée par un ressort, comme pour les soupapes de sûreté, avec quelques précautions supplémentaires pour empêcher de modifier la charge. Les garanties de bon fonctionnement étant, dans ces conditions, les mêmes que pour les grandes soupapes de sûreté, l'intérêt des soupapes avertisseuses se réduit surtout à permettre d'éviter la levée des soupapes de sûreté. Quant au lieu d'être pressées par un ressort, les soupapes avertisseuses sont chargées d'un poids appliqué sur leur tige, comme cela a lieu dans la Marine américaine, les soupapes avertisseuses diffèrent des soupapes de sûreté sous le rapport des causes pouvant altérer le fonctionnement. Quelques ingénieurs ont plus de confiance dans l'action directe des poids que dans celle des ressorts. D'autre part, les poids, à supposer qu'ils aient un certain avantage à terre, ont, à bord, l'inconvénient de produire une pression variable quand le navire se trouve sur mer agitée; les oscillations du navire et sa translation orbitaire sur

les vagues font varier, en effet, la pesanteur sensible, et provoquent ainsi la levée des soupapes; ce motif a fait abandonner l'emploi des poids dans la Marine française, même pour les soupapes avertisseuses.

167. — *Soupapes de sûreté. Calcul de leur section.* — Tandis que, pour régler le niveau de l'eau, on se contente habituellement de manœuvres faites à la main, d'après une surveillance exercée par des hommes, pour la pression, au contraire, il y a toujours un régulateur automatique qui est la soupape de sûreté.

Bouvet
Soupape de sûreté double

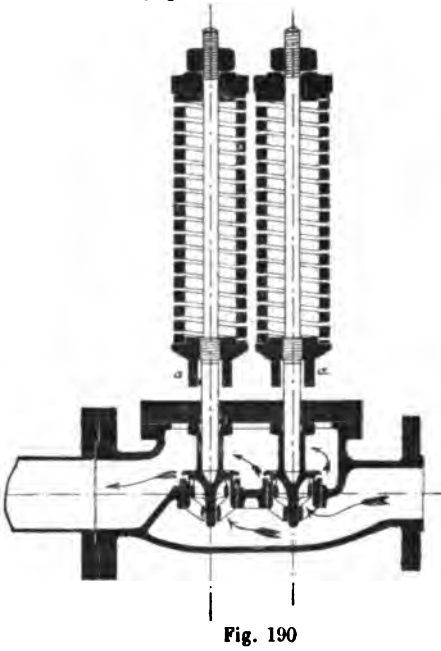


Fig. 190
a Leviers de soulagement.

Les soupapes de sûreté des chaudières marines ont été pendant longtemps chargées par un contrepoids agissant sur un levier du deuxième genre; quelques soupapes de ce modèle sont encore en service. Les variations de la pesanteur sensible, dont nous venons de parler, et qui peuvent s'élever au quart et même au tiers de la pesanteur réelle, ont conduit à remplacer l'action des contrepoids par celle de deux ressorts à boudin en acier, que l'on peut faire assez puissants pour se passer de levier; la tête des deux ressorts agit par traction sur une traverse, qui presse directement sur la tige de la soupape; des bagues d'arrêt sont disposées de manière à empêcher de bander les ressorts au delà de la tension correspondant au timbre de la chaudière.

Des dispositions sont toujours prises pour permettre d'ouvrir les soupapes à la main, quelle que soit la pression dans la chaudière. A cet effet, sur les anciennes soupapes, on soulageait le contrepoids à l'aide d'une *pédale* actionnée par une tige filetée. Dans les soupapes à ressorts, on soulève la traverse des ressorts à l'aide d'un levier actionné par une tige filetée. La manœuvre à la main doit toujours être facile; elle doit, en temps ordinaire, s'opérer avec une lenteur voulue, parce que les

variations brusques de pression peuvent amener des ébullitions tumultueuses; mais, en cas d'accident, il faut pouvoir ouvrir avec la plus grande rapidité.

Le tuyau d'échappement des soupapes de sûreté va maintenant au condenseur et non à l'atmosphère. C'est là une petite complication pour le tuyautage, mais elle est payée par des avantages importants : la perte d'eau douce est évitée, ainsi que le bruit assourdissant des anciens tuyaux d'échappement au-dessus du gaillard; enfin, en cas de fuites, l'appel du condenseur empêche la vapeur d'envahir la chambre de chauffe.

La section d'échappement de la vapeur par les soupapes de sûreté doit être suffisante pour donner passage, sous la pression de timbre, à toute la vapeur que les chaudieres produisent quand la machine est stoppée. Les règlements du *Board of trade* imposent, à ce sujet, une expérience de vaporisation, qui doit durer vingt minutes avec les feux poussés, en arrêtant, autant que possible, l'alimentation. On se contente, en France, d'imposer une section minimum, déterminée par des formules empiriques, dont il existe plusieurs modèles.

La règle usuelle adoptée pendant longtemps était établie en supposant la vitesse d'écoulement déterminée par la formule :

$$V = \sqrt{2g\,H},$$

dans laquelle H est la hauteur de la colonne gazeuse $\frac{p_o}{d}$.

Si p_o est le timbre, et d le poids du mètre cube de vapeur calculé comme pour les gaz soumis aux lois de Mariotte et de Gay-Lussac, on a :

$$d = \delta \times \frac{1{,}293}{1000} \times (p_o + 1)\frac{1}{1+\alpha t}.$$

Le volume de vapeur s'écoulant par seconde est

$$\Omega\, V,$$

et son poids est :

$$\pi = \Omega\, V d = \Omega d \sqrt{2g\frac{p_o}{d}} = \Omega\sqrt{2g p_o d},$$

ce qui donne, en rassemblant toutes les constantes en une seule M,

$$\pi = M\,\Omega \sqrt{\frac{p_o(p_o+1)}{1+\alpha t}}.$$

Admettant, d'autre part, que le poids π de vapeur produit par seconde

est proportionnel à la surface de chauffe S, on a, M_1 étant une nouvelle constante,

$$M_1 S = M \Omega \sqrt{\frac{p_o (p_o + 1)}{1 + \alpha t}},$$

$$\Omega = \frac{1}{4} \varpi D^2 = \frac{M_1}{M} S \sqrt{\frac{1 + \alpha t}{p_o (p_o + 1)}}$$

d'où l'on déduit, en appelant M_2 le facteur ne renfermant que des constantes :

$$D = M_2 \sqrt{S} \sqrt[4]{\frac{1 + \alpha t}{p_o (p_o + 1)}}$$

ou, appoximativement, en modifiant la constante, pour y faire entrer le le facteur $1 + \alpha\ t$ supposé constant, et en remplaçant $p_o + 1$ par p_o :

$$D = M_3 \sqrt{\frac{S}{p_o}}.$$

Les ingénieurs des mines sont arrivés, par expérience, à la formule empirique suivante, dans laquelle la pression est évaluée en atmosphères :

$$D = 1{,}3 \sqrt{\frac{S}{p_o + 0{,}588}}.$$

Cette formule s'écrit, en appelant P_o la pression absolue $p_o + 1$,

$$D = 1{,}3 \sqrt{\frac{S}{P_o - 0{,}412}}.$$

On double par précaution le diamètre D, ce qui quadruple la section, et on prend, comme valeur réglementaire,

(1) $$D = 2{,}6 \sqrt{\frac{S}{P_o - 0{,}412}};$$

on assure ainsi la possibilité de faire toujours tomber rapidement la pression.

La formule (1) a été longtemps suivie dans la Marine, et sert encore quelquefois ; mais, indépendamment, du peu de valeur des principes théoriques sur lesquels elle est fondée, elle donne la valeur de D en fonction de la surface de chauffe, qui, dans les chaudières marines, représente très mal la puissance de production de vapeur.

Actuellement, on se sert à Indret, d'une formule différente, établie

par M. Brosser en prenant, pour le débit de vapeur π, en kilogrammes par seconde, d'un orifice de section Ω, l'expression :

$$\pi = \Omega\,(25{,}5 + 144{,}5\ P_o),$$

ou :

$$\pi = \Omega\ (170 + 144{,}5\ p_o).$$

P_o et p_o étant comptés en atmosphères; cette expression, due à M. Hugoniot, tient assez bien compte des lois de l'écoulement des gaz suivant la théorie mécanique de la chaleur.

La production de vapeur de la chaudière, par seconde, est toujours très sensiblement :

$$\pi = \frac{8\,G\,C}{3\,600},$$

G étant la suface de grilles, et C la combustion de charbon par heure et par mètre carré de grilles; M. Brosser estime ainsi la vaporisation à 8 kilogrammes d'eau par kilogramme de charbon, chiffre assez exact, bien qu'un peu faible aujourd'hui.

L'équation :

$$\Omega\,(170 + 144{,}5\,p_o) = \frac{8\,G\,C}{3\,600}$$

donne, pour le diamètre exprimé en mètres, la valeur :

$$D = \sqrt{\frac{32}{3\,600\,\pi}}\ \sqrt{\frac{G\,C}{170 + 144{,}5\,p_o}}.$$

M. Brosser prend pour C une valeur constante, égale à 80 kilogrammes, en supposant que le tirage forcé peut être arrêté instantanément, quand on doit se débarrasser de la vapeur. En donnant à C cette valeur et en remplaçant la pression effective p_o en atmosphères par la pression p_1 en kilogrammes par centimètre carré, la formule devient :

$$D = 0{,}242\ \sqrt{\frac{G}{175{,}61 + 144{,}5\,p_o}} \qquad (2)$$

Des expériences faites à Indret ont vérifié que la formule (2) donne des sections capables de débiter le double de la vapeur produite dans une chauffe active au tirage naturel. On a déterminé, à l'aide de cette formule, les diamètres d'une série de soupapes qui suffisent pour tous les appareils évaporatoires à construire.

Comme il importe, pour avoir un bon portage, de réduire le diamètre D, on fait les soupapes doubles, c'est-à-dire que l'on met deux soupapes juxtaposées pour une seule prise de vapeur et un seul tuyau d'échappement.

168. — *Soupapes de sûreté à grande levée.* — Les formules précédentes supposent que la levée h de la soupape donne une section d'échappement

$$\varpi \, Dh,$$

au moins égale à la section

$$\frac{1}{4} \varpi \, D^2$$

c'est-à-dire que l'on a :

$$h \gtrless \frac{1}{4} D.$$

Quand la levée de la soupape a été déterminée de manière à satisfaire à cette condition, un problème assez délicat consiste à obtenir la levée complète, sans que la pression s'élève sensiblement au-dessus de p_o ; en effet, les ressorts étant toujours assez courts, leur tension s'accroit très notablement avec la levée de la soupape. La solution consiste à utiliser la réaction du jet de vapeur, animé d'une grande vitesse, contre un obstacle qui le force à s'infléchir. La figure 191 représente la forme de soupapes adoptée à Indret ; en outre de la réaction dynamique exercée contre la soupape et son rebord, un certain effort statique est exercé sur le rebord, dès que la vapeur commence à s'échapper. L'excès de tension du ressort se trouve ainsi contre-balancé, et la soupape se soulève en grand.

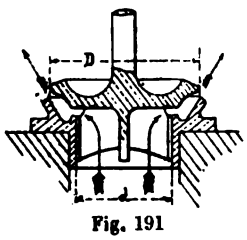


Fig. 191

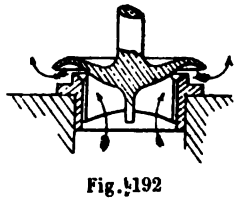


Fig. 192

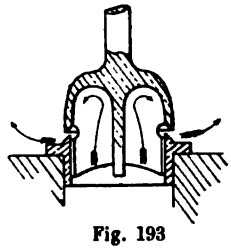


Fig. 193

Les figures 192 et 193 représentent d'autres formes de soupapes, avec lesquelles la réaction dynamique est seule utilisée, pour conduire au même résultat.

La surface de portage ne subit pas la pression quand la soupape est appliquée sur son siège, et la supporte quand la soupape est levée ; de là deux pressions différentes, l'une d'ouverture, l'autre de fermeture. Autrefois, les sièges étaient coniques, la pression se calculait sur la grande base ; le timbre était donc la pression de fermeture ; le rapport des deux surfaces était égal à 1,17, et, par suite, les chaudières timbrées à $2^k,25$ ne devaient laisser échapper la vapeur qu'à $2^k,63$; en réalité les

soupapes se levaient vers 2k,45, se mettaient à battre et se refermaient à peine à 2k,25. Actuellement, la charge des ressorts se calcule d'après les petits diamètres; on la fait égale à 1,05 Sp_o, c'est-à-dire supérieure d'un vingtième au timbre nominal. Le siège est plan. La largeur du portage est réduite à 1, ou à 2 millimètres au plus, ce qui rend le rodage facile, réduit l'écart entre les deux pressions d'ouverture et de fermeture, et diminue par suite les battements.

Le rodage des soupapes a besoin d'être fait avec grand soin. Autrefois, avec les grandes soupapes coniques, il fallait le faire à chaud, à cause des déformations de la boite dues aux dilatations; on n'obtenait presque jamais une parfaite étanchéité.

Les soupapes de sûreté doivent être l'objet d'une attention constante; elles doivant être soulagées de temps à autre, pour éviter les adhérences, qui pourraient laisser dépasser la pression de timbre de plusieurs kilogrammes.

Les soupapes, ainsi que leur siège, sont en bronze, pour éviter l'oxydation. La boite elle-même est en fonte, ou, de préférence maintenant, en acier moulé.

169. — *Soupapes d'arrêt. Robinets-vannes.* — Les soupapes d'arrêt sont placées sur la chaudière même, et destinées à ouvrir et à fermer, à l'origine même du tuyautage, les communications de vapeur. Des soupapes semblables sont établies sur les tuyaux de communication qui vont d'une chaudière à l'autre.

Les soupapes d'arrêt sont, avant tout, des appareils d'une grande simplicité, d'un fonctionnement sûr et rapide. La soupape est folle sur sa tige, et la tige, filetée au passage dans un guide placé en dehors de la vapeur, reçoit un mouvement de rotation, qui la fait avancer ou reculer, et qui lui est imprimé par un volant et par une chaine sans fin placée sous la main des chauffeurs. La soupape d'arrêt devrait se fermer automatiquement en cas de chute de pression dans la chaudière desservie. Cette disposition est réalisée dans la Marine anglaise; la vis de manœuvre déplace le butoir seul, dont la soupape est indépendante.

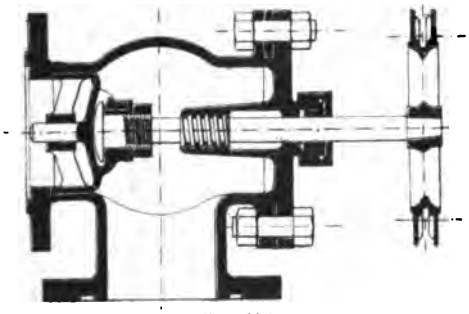


Fig. 194

La soupape d'arrêt sur la chaudière, le registre à l'entrée des cylindres, ont été longtemps les seuls moyens de fermeture, sur le tuyautage

de vapeur. Les soupapes d'arrêt, infiniment plus étanches que les registres, suffisaient à peu près pour prévenir tout mouvement involontaire de la machine; mais elles laissaient passage à des fuites encore sensibles, qui devenaient gênantes en cas de démontages à faire dans le tuyautage ou la machine. Depuis une dizaine d'années, on a doublé les soupapes d'arrêt d'un obturateur tout à fait étanche, consistant en une vanne à coulisse, pouvant être appliquée par un coincement énergique sur l'orifice qu'elle doit fermer.

Il existe des modèles nombreux de *soupapes-vannes* ou *robinets-vannes*. Leur fonctionnement offre un caractère commun : l'action de la vis qui les actionne produit d'abord la translation complète de l'opercule, puis son serrage, quand on ferme; elle produit d'abord le décoinçage et ensuite la translation, quand on ouvre. Tout cela n'est pas sans exiger des soins de construction et de montage; il est arrivé que des vannes Ciron (fig. 195), subissaient un supplément de coinçage par le fait du premier mouvement de rappel en arrière, ce qui rendait l'ouverture impossible ou du moins très difficile; la vanne Muller (fig. 196) est d'un fonctionnement plus sûr. En raison de leur complication, on n'emploie jamais les robinets-vannes sur les tuyaux de 60 millimètres de diamètre et au-dessous.

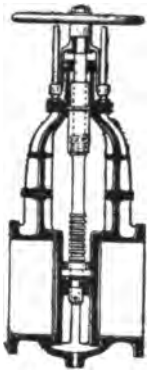


Fig. 195

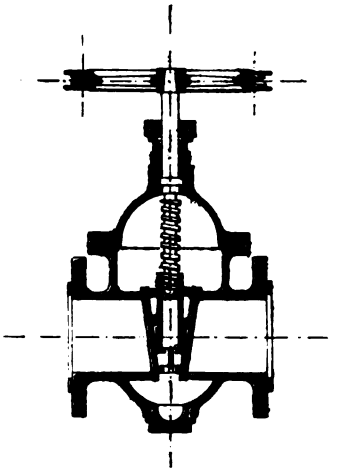


Fig. 196

En raison des grandes surfaces planes que présentent les robinets-vannes pour le portage et le glissement de l'opercule, la fatigue des matériaux, due à la pression de la vapeur et aux poussées exercées par le tuyautage, est très grande. Les premiers appareils, construits avec des boites en fonte de fer, à l'exemple des soupapes d'arrêt, ont donné des ruptures entrainant parfois mort d'homme. Maintenant les boites sont en bronze ou en acier moulé, l'acier devant être adopté quand la

température s'approche de 200 degrés ; de plus on a adopté des formes bombées ; enfin, on a pris des soins particuliers pour permettre la libre dilatation du tuyautage dans des joints glissants, à proximité des robinets-vannes. Les accidents ont disparu. Malgré ces améliorations, tout n'est pas bénéfice, dans la multiplication des appareils de fermeture, acceptée pour parer à toutes les avaries à prévoir dans un tuyautage de vapeur très complexe. Les appareils de sûreté, en raison des avaries particulières auxquelles ils sont exposés, restent toujours eux-mêmes une cause de danger. Il y a plutôt tendance maintenant vers une certaine simplification ; on réduit quelquefois à deux, les trois tuyautages de vapeur complets qui s'installaient récemment sur les chaudières, l'un pour les machines principales, le second pour leurs appareils auxiliaires, le troisième pour les machines de service du bord, dynamos, treuils, pompes, etc.

Une soupape automatiqne, qui fermerait l'arrivée de vapeur en cas de chute de pression dans le tuyautage, serait un appareil de sûreté d'une très grande importance.

Régulateur-détendeur
(système Belleville)

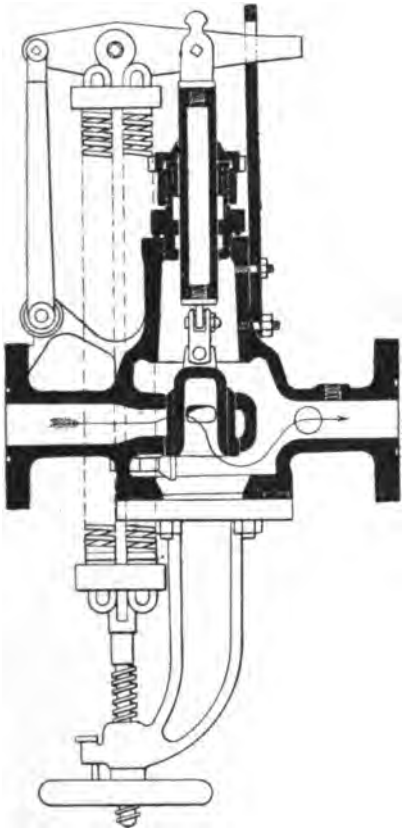


Fig. 197

170. — *Détendeurs de vapeur ou soupapes régulatrices.*—On désigne sous ce nom des appareils d'un usage assez répandu, en dehors des machines à vapeur, qui permettent de débiter, à une pression constante et déterminée, le gaz ou la vapeur fournis par un réservoir à une pression supérieure quelconque.

Le principe de l'appareil est le suivant. La soupape régulatrice est pressée, en dessous, par la vapeur de la machine, en dessus par un ressort antagoniste, dont la tension est réglée selon la pression de marche adoptée ; elle ne subit nulle part la pression au réservoir. Les orifices sont disposés sur une lanterne, de manière à s'ouvrir quand

l'action des ressorts est prépondérante. Par suite, dès que la pression baisse du côté de la machine, l'admission augmente et la ramène à sa valeur normale.

Le détendeur travaille donc comme une sorte de registre automatique, mais avec l'avantage de rendre l'allure plus régulière que ne le fait un registre ordinaire. Considérons, en effet, un moteur marchant à 12 kilogrammes de pression, et recevant, par un détendeur, la vapeur d'une chaudière marchant normalement à 17 kilogrammes ; supposons que la production de vapeur s'abaisse accidentellement ; l'allure de la machine ne sera pas influencée, tant que la pression à la chaudière ne sera pas descendue au-dessous de 12 kilogrammes, c'est-à-dire tant que l'on n'aura pas consommé 5/17 de la vapeur en réserve ; or les irrégularités de marche sont en général de faible durée, et ne peuvent produire un aussi fort déficit dans la production de vapeur.

Le détendeur est un organe particulièrement nécessaire aux chaudières Belleville qui tiennent précisément la pression de 17 kilogrammes, tandis que la pression à la machine, déterminée selon l'allure, ne doit pas dépasser 12 kilogrammes. Il a été adopté, depuis vingt ans sur ces chaudières, à cause de la valeur extrêmement faible du volume de réservoir de vapeur, qui rendrait la machine sensible aux moindres oscillations dans la production de vapeur. Son effet est de neutraliser totalement l'influence des variations de pression de 5 kilogrammes, qui correspondraient à des variations de $0^k,5$ seulement, dans les chaudières sans détendeurs ayant un coffre à vapeur dix fois plus grand, pour le même incident de marche des feux. Le détendeur, en empêchant la machine d'accélérer son allure, quand la pression remonte, combat très efficacement les entrainements d'eau, auxquels les chaudières Belleville ont été longtemps sujettes.

Le détendeur des chaudières Belleville se place, sur le tuyau de vapeur, à la suite de l'épurateur.

Le détendeur, comme tous les appareils étranglant un courant de vapeur, produit une légère surchauffe, égale environ à la moitié de la chute de température qui correspond au passage d'une pression à l'autre, pour la vapeur saturée.

Le détendeur est impropre à donner instantanément les changements d'allure que l'on demande souvent aux appareils moteurs des bâtiments de guerre. Il n'est pas indispensable aux autres chaudières tubuleuses, munies de coffres à vapeur beaucoup plus grands que le séparateur Belleville; mais son emploi tend à se généraliser.

171. — *Tuyautage de vapeur. Joints glissants. Purges.* — Le tuyautage de vapeur en cuivre rouge, qui a succédé aux premiers tuyaux en fonte de fer, a, pendant longtemps, parfaitement répondu aux besoins de la marine. La matière était d'un façonnage facile et d'une conservation parfaite. La résistance était suffisante. Les déchirures des gros tuyaux étaient cependant toujours à craindre, non pas à la brasure même, mais près de la brasure, sur la ligne qui limitait la partie chauffée pendant l'opération du soudage, à peu près comme sur les foyers de chaudières cylindriques en tôle soudés.

L'adoption des hautes pressions a rendu la résistance des tuyaux en cuivre insuffisante, moins en raison de l'accroissement de la charge qu'à cause de l'altération des qualités du métal à la température de 200 degrés. On a cherché d'abord un remède à la nouvelle situation en renforçant les tuyaux en cuivre, soit à l'aide de cercles en fer très rapprochés, soit à l'aide d'un revêtement complet en fil de fer ou d'acier, présentant, sur chaque spire, un nœud étudié de façon que la rupture d'une spire ne compromit pas la tenue des spires adjacentes.

Actuellement, le gros tuyautage se fait en acier, à soudures recouvertes de couvre-joints rivés ; les pièces d'assemblage sont moulées en acier. La résistance est ainsi assurée, mais l'entretien exigera des soins délicats; la durée ne dépassera sans doute pas celle des collecteurs de chaudières, de diamètre et d'épaisseur analogues.

La cause principale de fatigue, toujours à craindre pour le tuyautage, quelle que soit la matière employée, provient de la dilatation, qui entraîne fatalement la rupture du tuyau, quand elle ne peut pas s'opérer librement entre deux parties fixes.

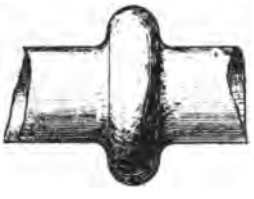


Fig. 198

Joint glissant

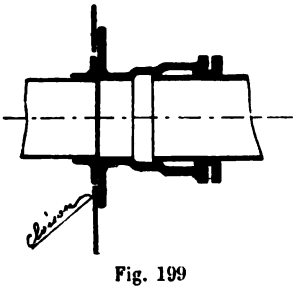


Fig. 199

Avec le cuivre rouge, on comptait beaucoup sur la flexibilité du métal. On façonnait souvent, sur les tuyaux d'émission au condenseur, des renflements formant soufflet (fig. 198) ; aux tuyaux de vapeur, on s'appliquait à faire suivre une forme contournée, favorable aux déformations, sans leur faire former toutefois la boucle complète en queue de porc,

qui eut donné peut-être la sécurité. On faisait aussi une large application des joints glissants, dans les parties rectilignes. Les coudes des tuyaux n'empêchaient pas les ruptures au joint des collerettes d'aboutissement sur les pièces fixes. Les joints glissants se sont quelquefois coincés, et ils n'ont pas toujours empêché la fatigue des tuyaux rendus cassants par la haute température.

Avec les tuyaux en acier actuels, les joints glissants constituent l'unique moyen de prévenir l'effet des dilatations. Ce moyen est d'une efficacité assurée, sous la condition expresse que les deux parties du tuyau soient exactement guidées et ne puissent courir qu'en ligne droite, l'une par rapport à l'autre. Il faut donc que le tuyautage de vapeur ne soit composé que de parties rectilignes, réunies entre elles par des raccords absolument fixes en position et en direction.

Une précaution très importante, pour la sécurité du tuyautage, est la distribution de purges capables d'extraire la totalité de l'eau, que la vapeur peut déposer dans toutes ses parties, et surtout dans les poches formées par les montées et les descentes des tuyaux. Les précautions prises, pour n'envoyer aux moteurs que de la vapeur sèche ou même surchauffée, n'empêchent nullement l'eau de se condenser dans les tuyaux, en quantité parfois considérable, surtout pendant les stoppages, et pendant la longue opération du réchauffage de la machine avant le départ. Quand la vapeur, subitement lancée avec une très grande vitesse dans le tuyautage au moment de la mise en route, y rencontre une masse d'eau relativement froide, elle se condense elle-même en communiquant à l'eau réchauffée la totalité de sa quantité de mouvement. La masse liquide ainsi lancée et entraînée par le courant de vapeur, va frapper les parois coudées, et peut leur faire subir des efforts locaux très supérieurs à la charge d'épreuve du tuyautage. Cette explication fait comprendre comment les déchirures de tuyaux, qui ont eu parfois des conséquences graves, se sont presque toujours produites au moment même du départ, et comment la paroi du tuyau déchiré s'est souvent reployée violemment à l'extérieur, d'une manière qui montre bien l'effet d'un choc et d'une vitesse imprimée au métal.

Le mécanicien doit donc toujours purger avec grand soin tout son tuyautage, avant de mettre en marche.

172. — *Séparateurs et épurateurs. Sécheurs et surchauffeurs de vapeur.*

Les accessoires de chaudières destinés à transformer en vapeur sèche la vapeur plus ou moins chargée d'eau, qui se dégage de la surface liquide, sont de deux sortes. Les uns fonctionnent mécanique-

ment, les autres opèrent par échauffement en donnant un supplément de vaporisation.

Les appareils agissant par action mécanique reposent tous sur le même principe, qui consiste à faire suivre au courant de vapeur des coudes brusques, dans lesquels l'eau entrainée est projetée, en raison de son inertie, sur la paroi extérieure. Les deux noms de *séparateurs* et d'*épurateurs* différencient ces appareils, d'après la quantité d'eau qu'il s'agit d'extraire.

Les séparateurs, qui sont particuliers aux chaudières Belleville, dont ils forment une partie intégrante plutôt qu'un accessoire, ont pour but d'extraire l'eau, en proportion importante, qui ne doit pas s'engager dans le tuyau de vapeur. Ils sont décrits au numéro 100 et représentés figures 116 et 117.

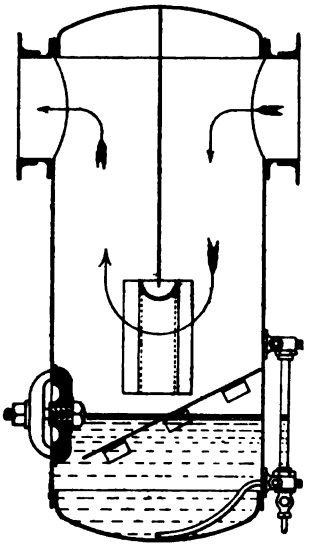


Fig. 200

Les épurateurs se placent dans le tuyautage de vapeur, avant l'arrivée à la machine, pour extraire de petites quantités d'eau, venues de la chaudière ou condensées dans le trajet. On en place presque toujours sur le tuyautage de vapeur des chaudières tubuleuses de tout modèle, et souvent sur celui des chaudières cylindriques. Ils se composent ordinairement d'un simple réservoir cylindrique vertical, muni d'une cloison médiane, que la vapeur contourne comme l'indique la figure 200. L'eau séparée, y compris celle déposée sur l'écran et ramenée vers les parois, s'amasse à la partie inférieure du réservoir, d'où on l'extrait par un tuyau de purge. Un tube de niveau complète l'appareil.

Comme une négligence dans la manœuvre de la purge produirait un entrainement d'eau dangereux, si le niveau de l'eau venait à s'élever jusqu'à l'écran de séparation, il est prudent de rendre automatique la manœuvre du robinet de purge, en la faisant commander par un flotteur. Les épurateurs des chaudières Belleville, en particulier, sont munis du purgeur automatique représenté figure 201, dans lequel le flotteur, au lieu d'agir directement sur la valve de purge, commande un petit piston à vapeur qui conduit cette valve.

Les appareils qui opèrent par échauffement portent le nom de sécheurs ou de surchauffeurs, selon qu'on se propose d'obtenir de la vapeur sèche saturée ou de la vapeur surchauffée au-dessus du point

Purgeur automatique sur un épurateur de vapeur

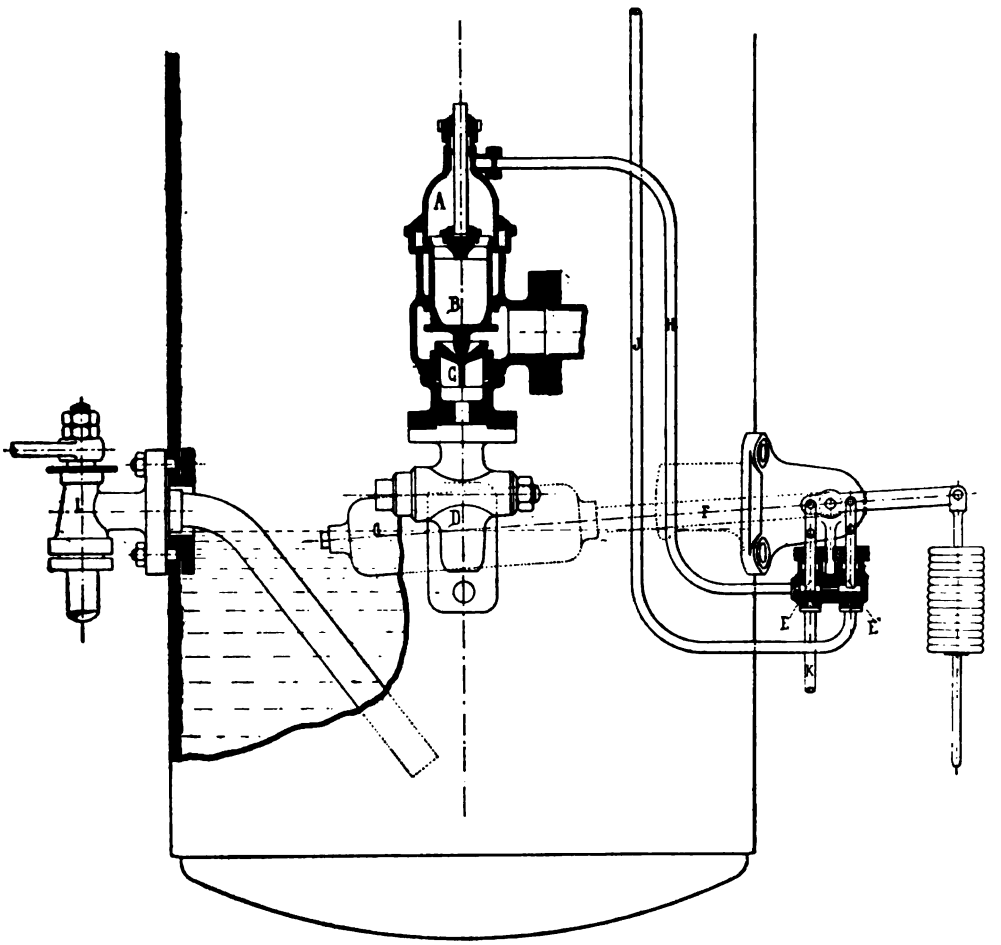


Fig. 201

A Purgeur automatique.
B Piston du purgeur.
C Clapet du purgeur.
D Communication du purgeur avec l'épurateur.
EE' Soupapes de commande du purgeur.
F Levier de manœuvre des soupapes.
G Flotteur.
H Arrivée de vapeur sur la face supérieure du piston B.
J Prise de vapeur au sommet de l'épurateur.
K Tuyau de purge des soupapes.
L Purgeur à main.

de saturation ; ils ne diffèrent les uns des autres que par l'étendue de la surface de chauffe, et constituent toujours une sorte de petite chaudière supplémentaire placée à la base de la cheminée.

Provence

Surchauffeur à lames

Coupe AB

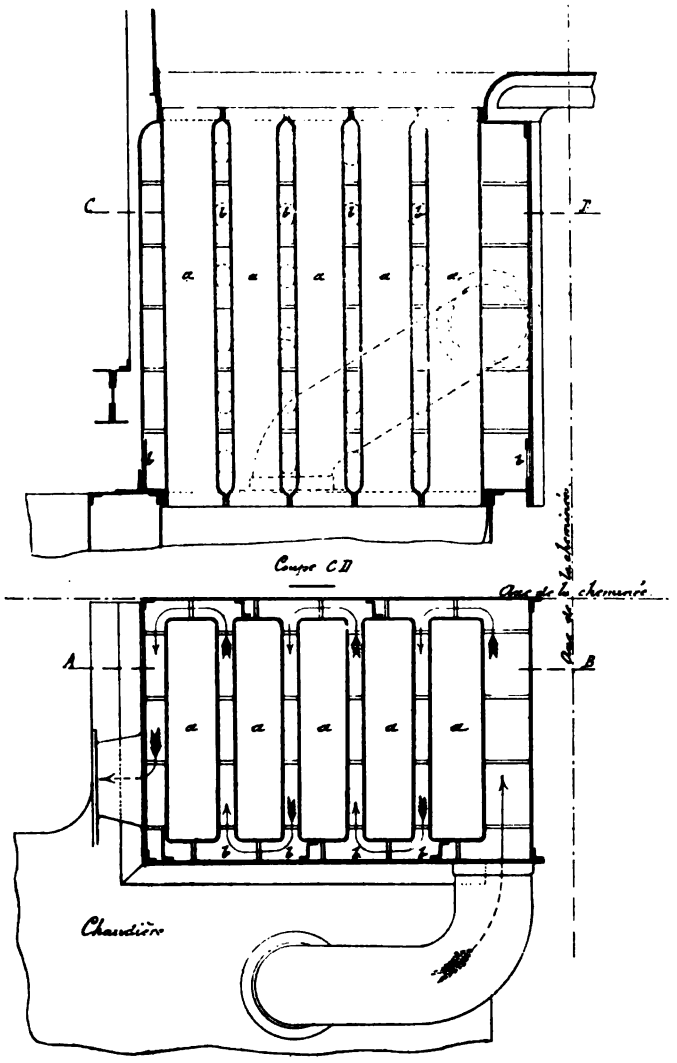


Fig 202

a Conduits de fumée. | *b* Portes de visite.

Les chaudières des frégates cuirassées de M. Dupuy de Lôme étaient munies d'un sécheur à lames ou à carneaux, dont la figure 202 repré-

Jérôme-Napoléon

Surchauffeur Lafond

Coupe AB

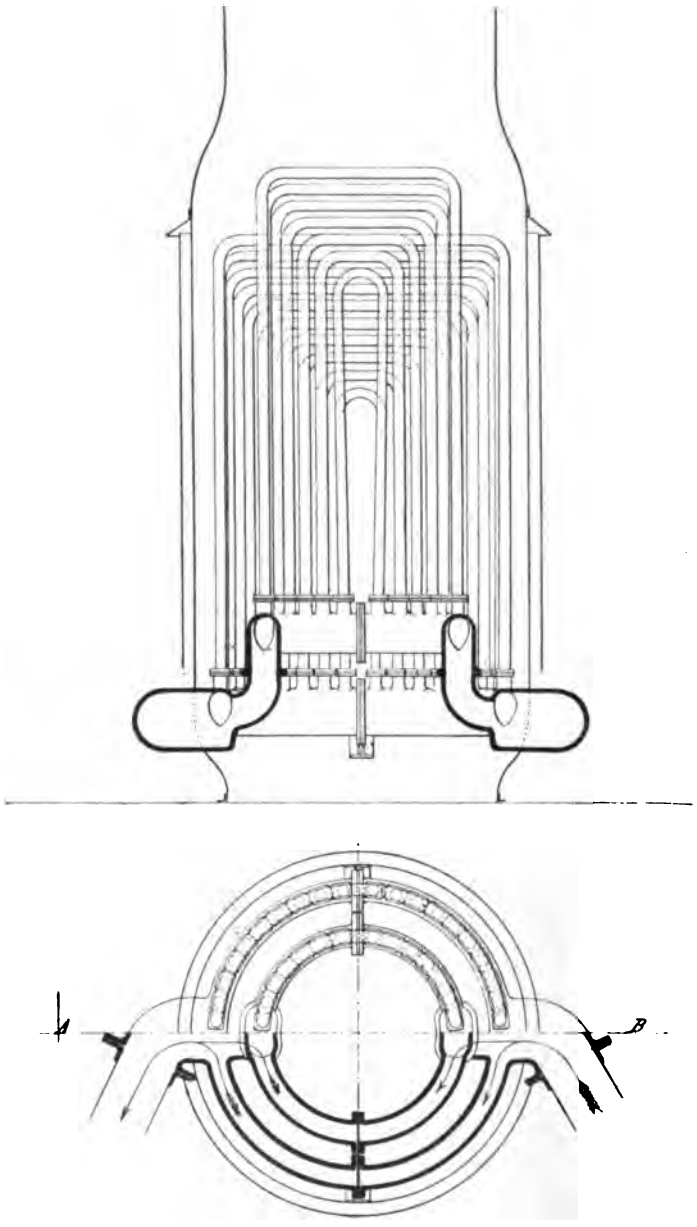


Fig. 203

circulation ne s'établit pas; les inscrustations se forment par suite facilement dans la partie inférieure des pendentifs.

Chaudière Field

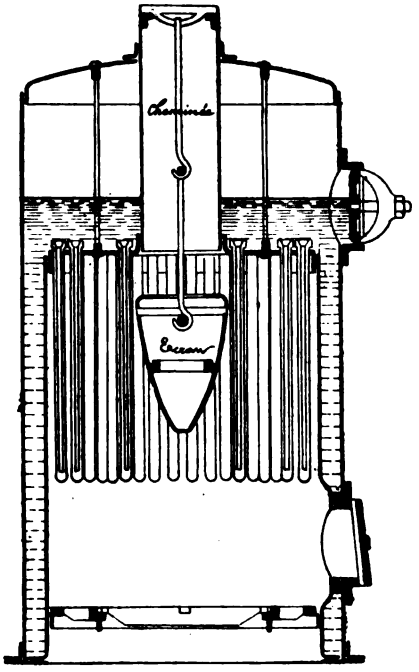


Fig. 138

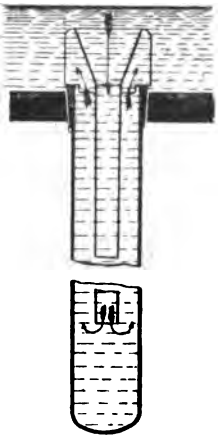


Fig. 139

118. — *Chaudière Collet.* — *Chaudière Niclausse.* — La chaudière Collet perfectionnée par MM. Niclausse (fig. 141 et 141 *bis*) est une combinaison de la chaudière D'Allest, ou mieux encore de la chaudière américaine Babcock et Wilcox, et de la chaudière Field. Chaque tube se com-

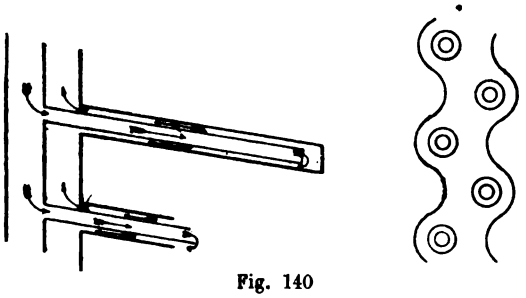


Fig. 140

pose, comme dans cette dernière, de deux parties concentriques; un tuyau central amène l'eau jusqu'au fond du tube, puis l'eau revient par la partie annulaire, où elle se vaporise en partie, et fait retour dans une lame verticale appliquée à l'extérieur de la lame de distribution. Les

tubes débouchant ainsi dans deux lames d'eau séparées, rien ne fait obstacle à l'entrée de l'eau. L'analogie avec la chaudière Babcock con-

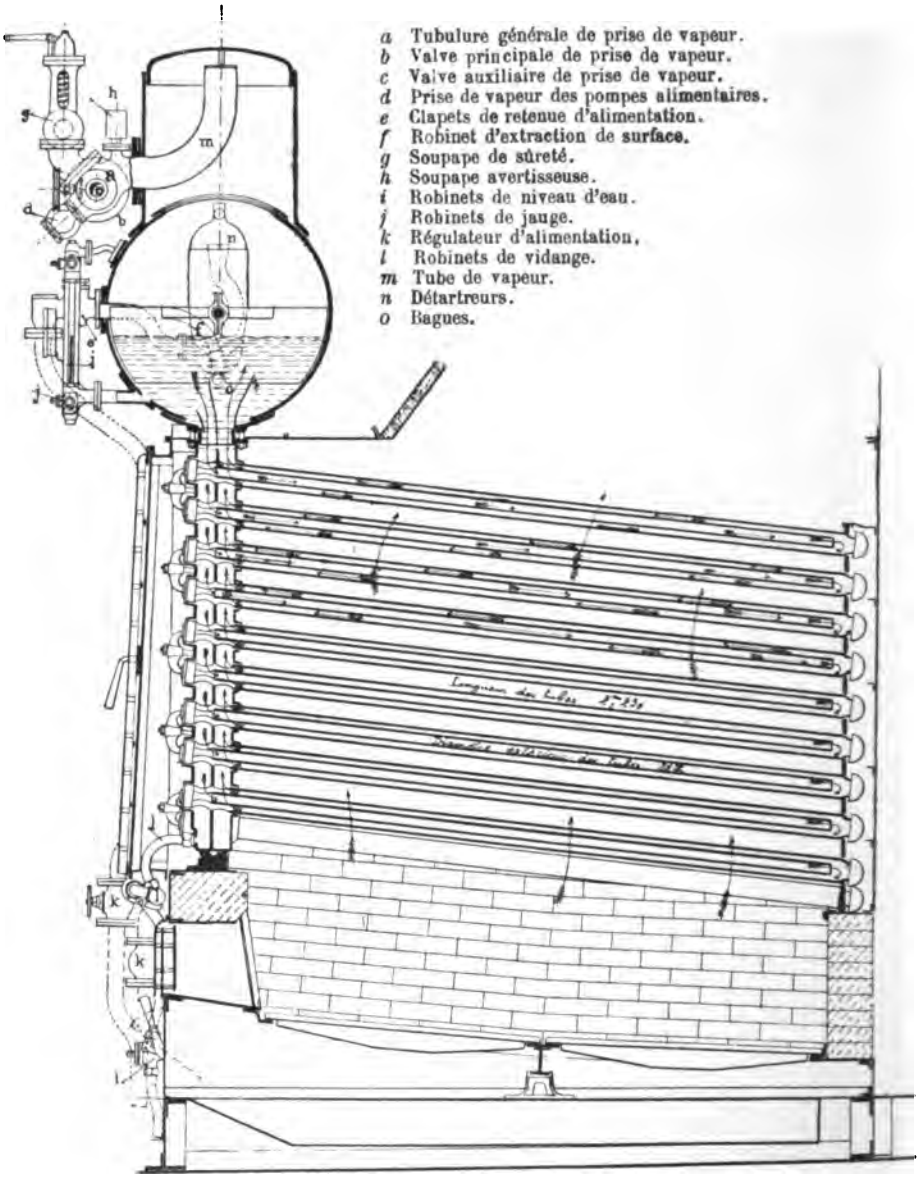


Fig. 141

siste en ce que les lames tètières se composent de conduits verticaux juxtaposés, à section rectangulaire.

La chaudière Collet ayant été ainsi établie sur un principe rationnel,

M. Niclausse a perfectionné tous les détails de construction, et a réalisé des facilités de démontage et de nettoyage tout à fait remarquables. La chaudière Niclausse est la seule que nous décrirons, l'appareil Collet ayant à peine été appliqué dans la marine.

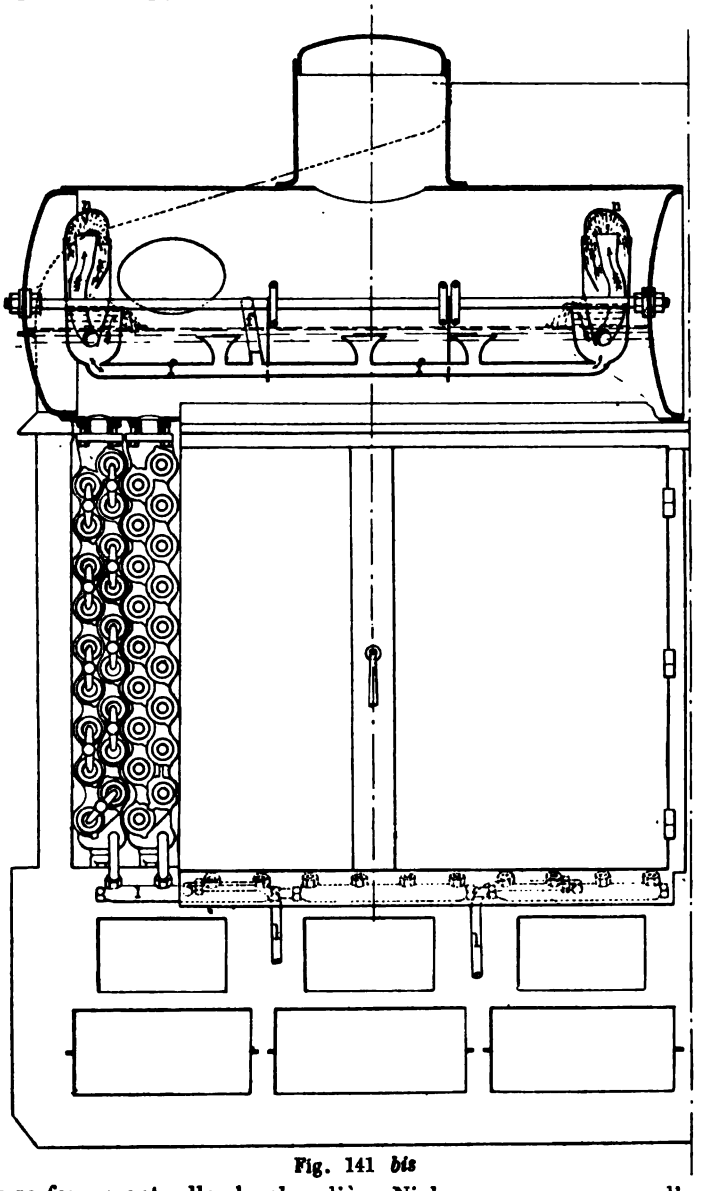


Fig. 141 *bis*

Dans sa forme actuelle, la chaudière Niclausse se compose d'un faisceau de tubes légèrement inclinés sur l'horizontale, comme ceux des chaudières Belleville, que les flammes traversent verticalement.

Chaque élément rectangulaire des lames de tête dessert deux files verticales de tubes disposés en quinconce. Entre deux éléments voisins, il y a un petit espace libre, par lequel on introduit les buses pour le ramonage à la vapeur.

La cloison de séparation des deux lames d'eau, de même que les tubes intérieurs, sont de simples diaphragmes ; l'étanchéité y est inutile.

Un réservoir cylindrique, dans lequel est le niveau de l'eau, surmonte les deux lames de tête ; une cloison partielle y sépare les deux courants, courant ascendant d'eau et de vapeur qui y aboutit, courant descendant d'eau qui y prend naissance. Ce réservoir renferme l'arrivée d'eau d'alimentation, et porte les soupapes et les tubes de niveau.

La facilité avec laquelle les tubes, tubes extérieurs et tubes intérieurs peuvent se dilater, indépendamment les uns des autres, sans fatiguer aucun joint a permis d'adopter pour leur jonction sur la lame de tête une disposition très simple, rendant les démontages très faciles, qui est représentée sur la figure 142.

Détails d'une lanterne.

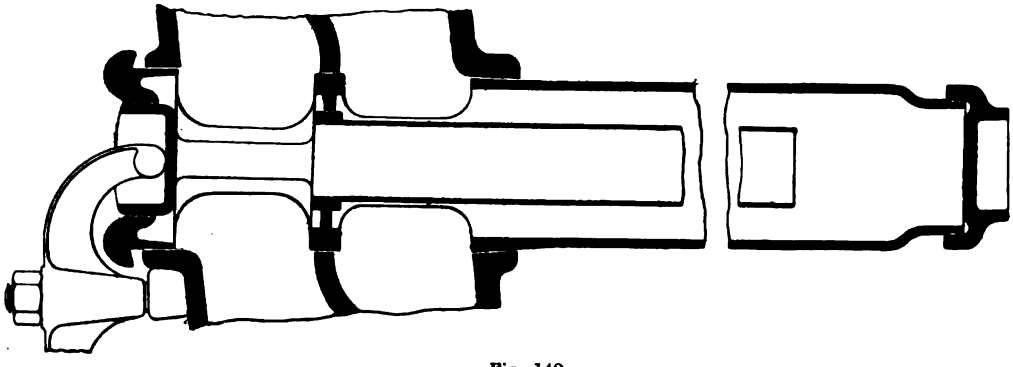


Fig. 142

Les tubes se prolongent par des parties ajourées appelées *lanternes*. La partie antérieure de la lanterne du tube intérieur est vissée dans la lanterne du tube extérieur, dont elle ferme l'extrémité, ce qui permet de retirer les deux tubes, soit ensemble, soit séparément. Les tubes, une fois en place, sont fixés par une griffe qui n'a aucune fatigue à supporter ; chaque griffe tient en place deux tubes doubles. L'étanchéité dans les deux cloisons extérieures de la lame d'eau est obtenue par le portage entre surfaces légèrement coniques ; le serrage, très faible, n'atteint pas la limite d'élasticité du métal. Il y a là une disposition très ingénieuse, qui parait pouvoir être appliquée dans diverses autres circonstances, et dont les bons résultats tiennent uniquement à la perfection de l'ajustage.

Cette disposition de lanternes, entraînant la suppression d'un long tirant établi par M. Collet à l'intérieur des tubes pour les tenir appliqués sur la façade, est, en particulier, l'œuvre de MM. Niclausse.

Comme détails de construction, signalons que les réservoirs de tête et les lanternes sont en fonte spéciale, et subissent plusieurs recuits avant la mise en place : les tubes extérieurs sont en fer avec soudure, en attendant que les tubes sans soudure soient descendus à des prix plus bas ; leur disposition en quinconce oblige les gaz à circuler en zigzag ; enfin les tubes intérieurs sont formés de deux pièces de tôle mince embouties et agrafées l'une sur l'autre à la filière.

Le réservoir supérieur, dans lequel aboutissent les divers collecteurs verticaux, est fortement affaibli par les ouvertures pratiquées dans ces collecteurs ; il y a là une partie de la construction exigeant une attention spéciale.

L'arrivée d'eau d'alimentation dans le coffre de vapeur ; est entourée d'une enveloppe en tôlerie légère qui forme déjecteur. On fait extraction dans le fond de ce déjecteur au moyen du tuyau *f*, qui sert également à faire l'extraction de surface.

L'extraction de fond est installée sur la face avant de la chaudière, au bas des lames d'eau descendantes ; des tubulures, partant de chaque groupe d'éléments, débouchent dans un collecteur qui permet de faire une extraction de fond simultanément dans tous les groupes.

La chaudière Niclausse a été essayée sur un navire de guerre seulement, le *Friant* ; elle va être installée sur l'*Elan*.

L'essai du *Friant* a présenté un intérêt particulier, parce qu'il s'agissait de comparer les trois modèles Belleville, D'Allest, Niclausse, sur trois bâtiments pareils : le *Chasseloup-Laubat*, le *Bugeaud*, le *Friant* (Voir n° 157). Au début, on a rencontré de très sérieuses difficultés, que l'on n'a surmontées qu'à la suite d'études minutieuses. Les premiers essais du *Friant* donnaient une très mauvaise utilisation de la chaleur ; la fumée était intense ; la culotte et toute la base de la cheminée rougissaient, à tel point qu'il s'est produit des affaissements complets de la cheminée. Puis l'expérience a appris à tenir sur les grilles une couche de charbon très mince de 10 centimètres d'épaisseur seulement, en employant à cet effet la chauffe méthodique indiqué au n° 46, qui est un curieux retour à un ancien procédé de chauffe rendu réglementaire dans la flotte en 1866 par l'influence du C.-Amiral Labrousse. On chargeait chaque foyer de deux en deux minutes, en introduisant chaque fois 13 kilogrammes de charbon. Dans ces conditions, les résultats obtenus ont été les suivants :

	Friant
1° — ESSAI DE CONSOMMATION	
Pression aux chaudières	12k,65
Pression aux détendeurs	9 ,958
Détente de la machine $\Delta = \frac{D^2}{i\,d^2}$	12,40
Charbon brûlé par mètre carré de grilles	50k,03
Charbon brûlé par cheval	0 ,667
2° — ESSAI DE VITESSE	
Pression aux chaudières	13k,68
Pression aux détendeurs	11 ,47
Détente de la machine $\Delta = \frac{D^2}{i\,d^2}$	7,63
Charbon brûlé par mètre carré de grilles	122k,2
Charbon brûlé par cheval	0 ,909

La comparaison des résultats obtenus avec les chaudières Niclausse du *Friant*, les chaudières Belleville du *Bugeaud*, et les chaudières D'Allest du *Chasseloup-Laubat* sera donnée au numéro 157.

Le tableau ci-dessous renferme les résultats d'expériences faites par MM. Humphrys et Tennant sur une chaudière d'atelier du système Niclausse, chauffée avec du Cardiff ordinaire :

Surface de grilles	1m²,78				
Surface de chauffe	58m²,53				
Durée de l'essai	8 heures	8 heures	8 heures	8 heures	4 heures
Consommation de charbon par m² de grilles et par heure	63k,18	92k,57	128k,58	142k,57	170k,89
Eau vaporisée réellement	9k,28	9k,25	8k,66	8k,27	7k,93
Eau vaporisée de 100° à 100° par correction	11k,20	11k,06	10k,45	9k,90	9k,59

Nous avons vu, au n° 37, comment, par l'emploi d'un système de tirage en cendrier clos, MM. Niclausse cherchent à rivaliser de puissance avec les chaudières à circulation accélérée; ils ont, dans une expérience, poussé la combustion jusqu'à 200 kilogrammes en obtenant encore un

rendement satisfaisant, qui correspond à une vaporisation de 50 kilogrammes d'eau environ par mètre carré de surface de chauffe. Dans leur atelier, MM. Niclausse sont arrivés à brûler la cheminée, mais non les tubes de la chaudière, en faisant subir à celle-ci une intensité de combustion, dans laquelle, à ce qu'ils assurent, la vaporisation d'eau atteignait 350 kilogrammes par mètre carré de surface de chauffe; ils continuent leurs expériences, moins pour chercher à obtenir une utilisation satisfaisante à ces hautes combustions, que pour prouver la solidité de leur appareil et pour dissiper les craintes qu'aurait pu faire naître l'ouverture d'un tube non soudé, sur le *Friant*. Il importerait surtout de bien connaître, pour la chaudière Niclausse, comme pour d'autres chaudières tubuleuses, les conséquences, très variables d'un modèle à l'autre, d'un abaissement de niveau dans le collecteur supérieur qui entraine ou supprime la circulation normale.

La chaudière Niclausse n'a probablement pas dit son dernier mot; dès à présent, sa supériorité est incontestable, au point de vue des facilités de nettoyage, de ramonage, de remplacement de pièces avariées. Elle présente, de plus, très peu d'encombrement horizontal.

La disposition du collecteur supérieur parallèle à la façade permet d'assembler les chaudières Niclausse en corps à plusieurs foyers, avec une seule alimentation et une seule prise de vapeur. Cette propriété, importante pour la simplicité du tuyautage et la facilité de la conduite se rencontre aussi sur les chaudières Belleville et les chaudières Oriolle, du modèle *Lansquenet;* elle fait défaut sur les chaudières D'Allest et sur toutes les chaudières à circulation accélérée.

119. — *Chaudière Dürr.*— La chaudière allemande modèle Dürr, est un autre dérivé de la chaudière Field, analogue au modèle Collet-Niclausse, mais avec un seul faisceau de tubes et une lame têtière double non segmentée (fig. 143). On trouve pour cette chaudière, la mention d'essais où la combustion a été poussée jusqu'à 340 kilogrammes par mètre carré de grilles; il est à supposer que le rendement calorifique était alors très faible, d'après ce que l'on sait des chaudières Belleville, Oriolle, Collet, et autres, chauffées avec cette intensité.

La chaudière Dürr va être installée en Allemagne sur l'*Ersatz-Freya* croiseur de 5.600 tonneaux; on installera en même temps, sur deux autres croiseurs identiques, des chaudières Belleville et des chaudières Niclausse; cet essai rappelle celui qui a été fait récemment en France sur trois croiseurs de 3.750 tonneaux, avec les chaudières Niclausse, Belleville et D'Allest.

Chaudière Dürr

Coupe longitudinale

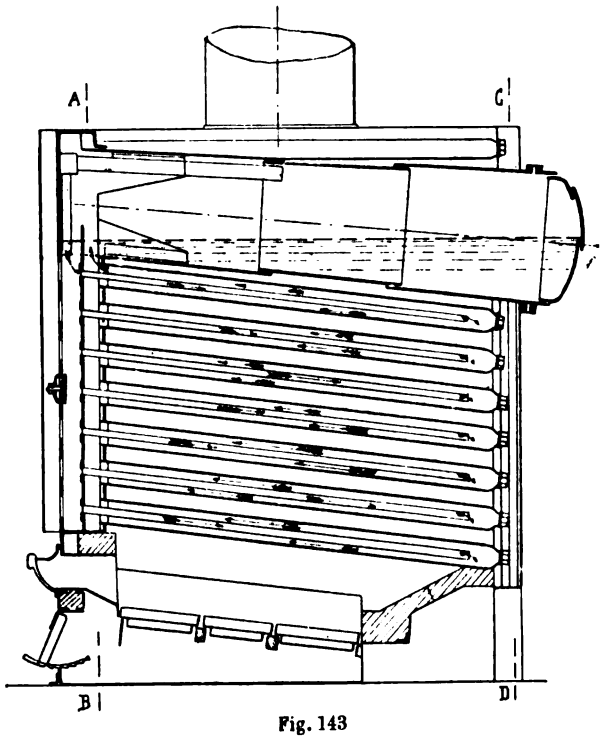


Fig. 143

Demi-coupe CD Demi-coupe AB

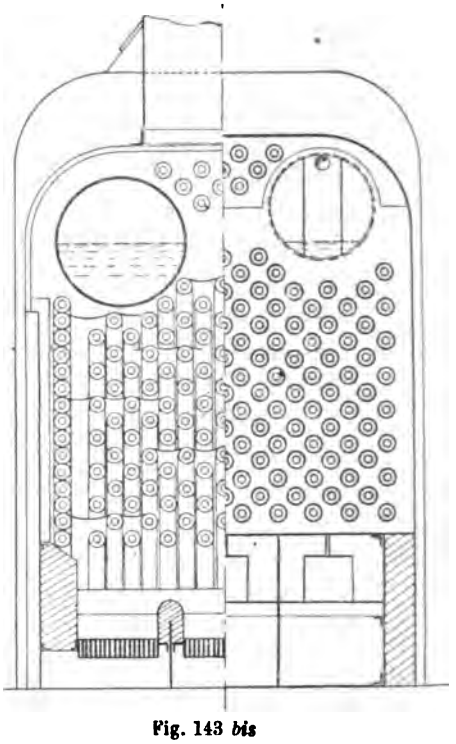


Fig. 143 *bis*

Emmanchement des tubes latéraux

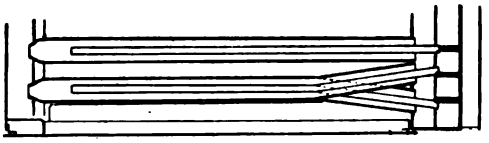


Fig. 143 *ter*

120. — *Chaudière De Dion-Bouton-Trépardoux.* — Le modèle De Dion-Bouton-Trépardoux est actuellement en service sur le torpilleur 18 et les torpilleurs de 1.000 chevaux 167, 168 et 169.

Cette chaudière a la forme d'un cylindre vertical; elle se compose principalement d'une lame d'eau extérieure et d'un réservoir central, avec des tubes rayonnants allant du réservoir à la lame (fig. 144).

Les tubes supérieurs, qui ne contiennent que de la vapeur, s'usent très vite, et tous les joints de tubes, même ceux des tubes à eau, sur le réservoir central, donnent fréquemment des fuites. De plus le volume d'eau est grand pour une chaudière tubuleuse, et par suite le poids de

l'appareil est élevé : 3^{tx},890 par mètre carré de grilles, le poids de l'eau entrant, dans ce total, dans la proportion de 12 %.

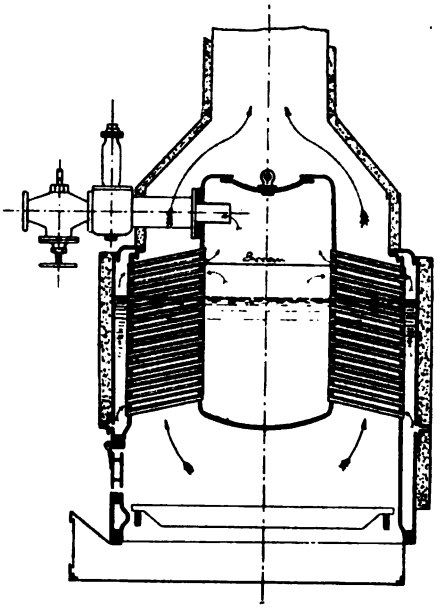


Fig. 144

Les essais en 1893 ont été satisfaisants, le torpilleur 167 a développé 1.133 chevaux avec une surface de grilles de 4^{m²},034, en brûlant 1^{k},165 par cheval : on a consommé 0^{k},533 seulement, à la marche économique de 143 chevaux. L'épreuve du service courant étant défavorable, le modèle De Dion et Trépardoux paraît devoir être abandonné pour les torpilleurs.

121. — *Chaudière Ward.* — Les applications les plus importantes du système de chaudière à circulation libre sont, de beaucoup, celles faites dans la marine française, qui a même été taxée parfois à ce sujet, d'une certaine témérité. Tout en agissant avec plus de prudence, la marine des Etats-Unis a fait, à bord du *Monterey*, une application intéressante de la chaudière Ward combinée avec des chaudières cylindriques.

La chaudière Ward présente une disposition spéciale se rapprochant par certains côtés de celle de la chaudière Trépardoux. Ses tubes d'eau forment des anneaux concentriques dans lesquels l'eau est distribuée, et d'où la vapeur est extraite par deux files rayonnantes de tubes verticaux tenant lieu des deux lames têtières du système Joessel. La forme générale de la chaudière est cylindrique. La grille est cir-

Chaudière Ward

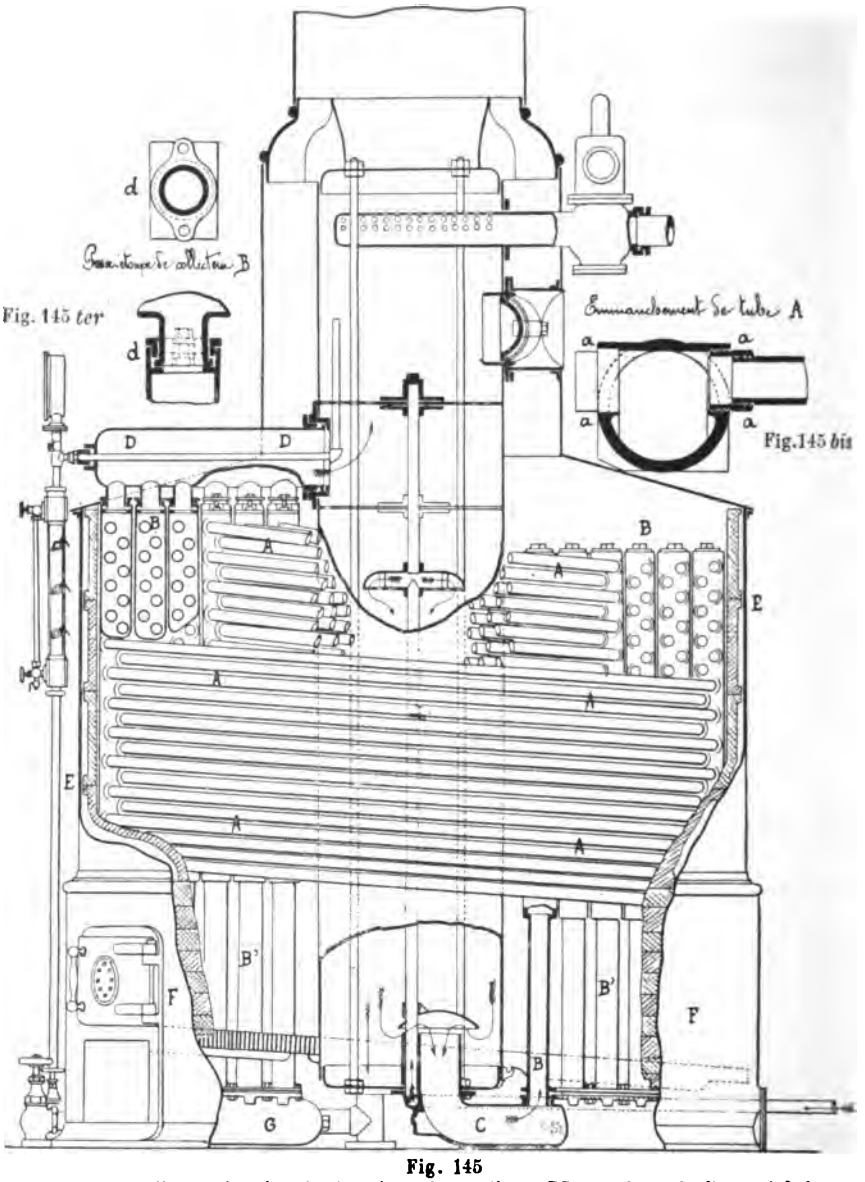


Fig. 145

AA Anneaux (*coils*) sectionnés entre les réservoirs verticaux BB, sur lesquels ils sont fixés par des bagues à double filetage *aa*.

BB Collecteurs verticaux, terminés à la partie inférieure par des tubes de diamètre moindre B'B', entre lesquels peut circuler la flamme.

aa (fig. 145 *bis*). Bagues de jonction des anneaux A et des collecteurs B.

CC Collecteurs horizontaux inférieurs, sur lesquels les tubes BB sont tenus par des joints fixes.

DD Collecteur horizontal supérieur, sur lequel les collecteurs verticaux sont assemblés à presse-étoupes.

dd (fig. 145 *ter*). Presse-étoupes en amiante à la jonction du collecteur D et des collecteurs BB. Les boulons de serrage, à tête aplatie en forme de T, se logent dans l'épaisseur des oreilles de la boîte.

EE Enveloppe en tôle de $2^{mm},5$, recouverte de briques creuses de 43^{mm}.

FF Enveloppe en tôle de 3^{mm}, recouverte de briques creuses de 120^{mm}.

GG Déjecteur » » » »

Nota. — Les chaudières du ***Monterey*** sont de ce système, mais d'un modèle plus grand, à 18 anneaux concentriques au lieu de 12.

culaire, et composée de segments distribués sur le pourtour du réservoir d'eau central qui la traverse (fig. 145).

Le réservoir central divisé en deux parties par une cloison diamétrale, amène d'un côté l'eau d'alimentation à la partie inférieure, en lui faisant traverser un déjecteur, et reçoit de l'autre côté la vapeur formée dans les tubes de chauffe.

Tous les joints sont très simples, l'appareil dans son ensemble doit présenter une grande élasticité, en raison de la courbure des tubes de chauffe. Le principal inconvénient est dans la forme de la grille, qui rend le chargement incommode sur les côtés, et impossible derrière le réservoir central, si la chaudière n'a qu'une porte.

Le modèle Ward est parmi les plus légers qui existent ; les deux chaudières du *Monterey*, de $6^{m2},85$ de surface de grilles totale, pèsent $15^{tx},33$ sans eau, et $17^{tx},77$ avec l'eau, ce qui fait $2^{tx},6$ seulement par mètre carré de grilles.

Dans les essais du *Monterey*, la chaudière Ward, constamment tenue dans les mêmes conditions de tirage qu'une chaudière cylindrique à retour de flamme, a constamment fonctionné de la manière la plus satisfaisante. Au tirage forcé, son rendement en vapeur était limité, non par les dangers de fatigue des joints, mais simplement par les soins à prendre pour ne pas fondre la grille, qui était en fonte de fer.

A la suite de l'expérience de *Monterey*, le commodore Melville s'est déclaré prêt à poursuivre l'application, au moins partielle, des chaudières tubuleuses dans la marine américaine.

122. — *Chaudière Charles et Babillot* — Le modèle Charles et Babillot, représenté figure 146 a pour caractère distinctif que les tubes sont traversés par des tubes de retour de flamme ; il dérive ainsi d'une ancienne invention abandonnée de M. Joessel.

La grande surface de chauffe obtenue sur ce modèle, et sa grande légèreté avaient été remarquées à l'Exposition de 1889 ; l'installation en fut décidée sur les torpilleurs *Sarrazin* et *Tourbillon*, ainsi que sur les torpilleurs de 1.000 chevaux, numéros 155, 156, 157, 158, 159, 160.

Les difficultés de circulation, qui favorisaient la formation des chambres de vapeur dans des espaces annulaires étranglés, rendaient cette chaudière extrêmement dangereuse, aux allures de chauffe actives des torpilleurs. Après des accidents répétés dans les rangées de tubes inférieurs, qui rougissaient fréquemment, la catastrophe du *Sarrazin*, en janvier 1894, fit absolument condamner la chaudière Charles et Babillot.

Chaudière Charles et Babillot

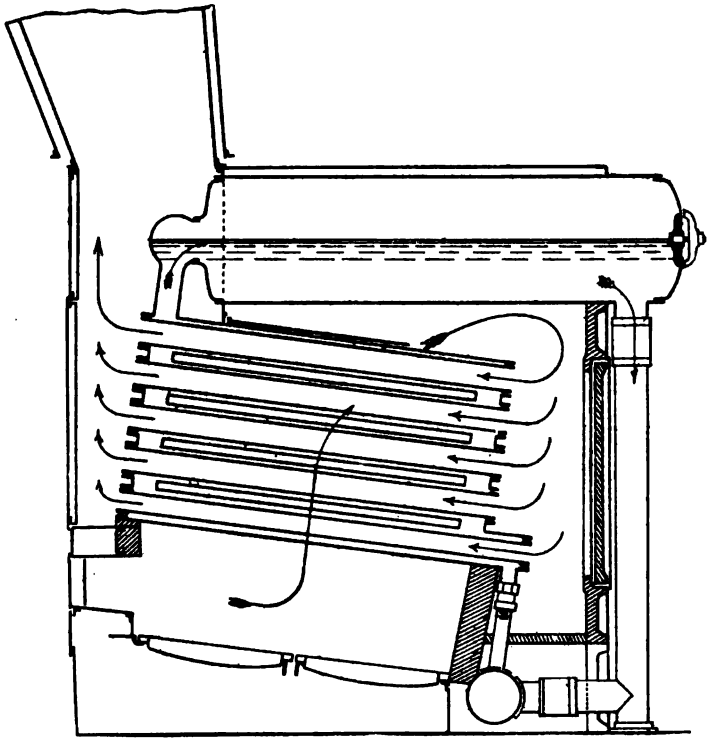


Fig. 146

123. — *Modèles divers.* — Il existe un très grand nombre d'autres modèles de chaudières, plus ou moins analogues aux précédentes, que je me bornerai à mentionner sommairement parce qu'elles n'ont eu que peu ou pas d'applications dans la marine.

Le système Joessel-D'Allest, a inspiré, en Angleterre, quelques modèles, parmi lesquels celui de M. Watt est le plus souvent cité.

La chaudière Kelly est une sorte de chaudière Niclausse à tôtière unique ; les tubes sont divisés en deux parties par une tôle diamétrale, disposition qui parait très inférieure à l'emploi des deux tubes concentriques.

Dans le modèle Bourgeois-Lencauchez, il y a aussi une seule lame tôtière divisée en deux parties ; les éléments tubulaires sont des V très aigus dont la branche inférieure reçoit l'eau tandis que la vapeur est dégagée par la branche supérieure. Cette disposition a été adoptée sur d'autres modèles, parmi lesquels le modèle Terme-Deharme, qui présente la particularité d'avoir des V à trois branches ; la chaudière Terme-Deharme est en service sur les bateaux parisiens.

Les modèles Menay, Lane, Hérisson sont d'autres dérivés de la chaudière Field fonctionnant dans les conditions de la chaudière Niclausse ; le dernier présente la forme et la disposition générale de la chaudière De Dion et Trépardoux.

Enfin, il faut mentionner quelques modèles à serpentins fonctionnant à peu près comme les chaudières Belleville, dont nous n'avons pas parlé à la fin du chapitre précédent, et dont l'un, le modèle Isoard, breveté en 1849, présente un intérêt historique.

M. Herreshoff a longtemps employé une chaudière composée d'un double serpentin à spires presque jointives entourant le foyer; nous avons vu, au n° 104, qu'il avait donné, à la circulation de l'eau, une direction particulière.

M. Thornycroft a essayé, en 1883, une chaudière à serpentins, à bord d'un petit bâtiment.

La chaudière Root, qui présente des analogies avec la chaudière Belleville, a des tubes spéciaux de dégagement de vapeur qui la distinguent des chaudières à serpentins proprement dites.

Les différentes chaudières que nous venons d'étudier ou d'énumérer sont très loin de constituer la liste complète des appareils à circulation d'eau horizontale ou à peu près horizontale. Les dernières expositions universelles, celle de Chicago en particulier, ont fait connaître un grand nombre d'autres types, dont plusieurs sont applicables à la marine.

Les chaudières à circulation libre, de même que celles à circulation limitée, continuent d'ailleurs à se perfectionner. Elles n'ont été appliquées jusqu'ici qu'avec des tirages forcés modérés, mais plusieurs des principaux constructeurs ne renoncent point à l'espérance de leur faire subir les plus grandes intensités de chauffe, et acceptent, comme nous avons vu, la lutte avec les chaudières à circulation accélérée.

CHAPITRE XIII

CHAUDIÈRES A CIRCULATION ACCÉLÉRÉE

124. — *Mouvement de l'eau dans un circuit de grande hauteur.* — Le principe des chaudières à circulation accélérée est dans la création d'un courant beaucoup plus rapide que ne peuvent l'être, soit le mouvement de la vapeur par rapport à l'eau presque immobile des chaudières Belleville, soit le mouvement d'entraînement de l'eau des chaudières à circulation libre. Les bulles de vapeur se trouvent ainsi détachées des parois, dès leur formation, et emportées vivement vers le collecteur de vapeur, sans pouvoir se souder ensemble et former des chambres de vapeur, quelle que soit l'intensité de la vaporisation.

Le moyen consiste à faire agir, sur des colonnes de grande hauteur, les forces qui produisent le mouvement naturel de circulation, et à disposer des canaux de retour de l'eau de haut en bas, faisant suite à ceux où la vapeur se dégage de bas en haut.

Les conditions du mouvement de l'eau, dans un circuit en partie chauffé et semé de bulles de vapeur, sont restées longtemps assez obscures. Elles ont été discutées avec soin, dans des mémoires et des ouvrages récents, parmi lesquels le *Traité des chaudières à vapeur* de M. Bellens et divers articles de l'*Engineer*. Elles ont fait l'objet d'expériences intéressantes de la part de plusieurs constructeurs, spécialement de M. Yarrow.

Le mouvement des liquides dans un circuit compliqué ne peut être déterminé que par l'expérience ; toutefois, le calcul, incapable de faire connaître *a priori* les vitesses, peut donner d'utiles indications, sur la nature et sur la valeur relative des forces qui produisent le mouvement.

125. — *Effet de la dilatation de l'eau.* — Considérons d'abord l'effet des différences de température dans un circuit tubuleux, tel que *a c b*

(fig. 147). Soit t la température du liquide. Au point d situé à la hauteur h au-dessous de l'orifice supérieur du tube, supposons que la température s'élève et devienne T. Le courant s'établit aussitôt ; quand il a duré assez longtemps pour que la colonne $d\,b$ soit remplie d'eau chaude, il devient permanent ; la différence de charge entre les deux branches, qui le produit, est, mesurée en hauteur d'eau :

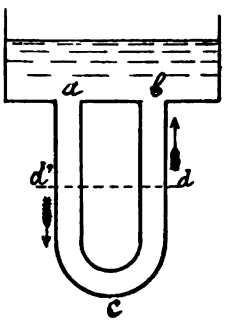


Fig. 147

$$p = h\left(\frac{1}{1+\alpha t} - \frac{1}{1+\alpha T}\right)$$

ou, en négligeant le terme en α^2,

$$(1) \qquad p = h\,\frac{\alpha\,(T-t)}{1+\alpha\,(T-t)}\,;$$

elle est sensiblement proportionnelle à T-t. La vitesse permanente est celle qui donne lieu à une résistance passive dans le circuit égale à la charge p.

Si le point d descend vers c, la hauteur h augmente et le mouvement s'accélère. Si ce point d'échauffement remonte ensuite dans la branche $c\,a$, le mouvement se ralentit, mais sans changer de direction ; quand par exemple l'échauffement se produit en d', à la même hauteur qu'en d, la différence de charge résultant de la différence des températures, t en $d'\,a$, et T en $d'\,c\,d\,b$, a la même valeur p que tout à l'heure, et la vitesse est aussi la même. Pour connaître le sens du mouvement, il faut donc considérer, non pas quelle branche est actuellement chauffée, mais quelle branche a été chauffée la première.

Si maintenant la source de chaleur étant en d' et le mouvement étant dirigé suivant la flèche (fig. 147), une nouvelle source ou de nouvelles sources de chaleur sont appliquées sur le trajet $d'\,c\,d\,b$, le mouvement s'accélèrera. On aura, par exemple, un mouvement plus rapide avec deux sources de chaleur égales en d et en d' qu'avec une seule source en d, ce qui, à première vue, aurait pu sembler paradoxal.

La valeur des dépressions p données par la formule (1) ne peut être bien grande, à cause de la faible valeur du coefficient α ; elle doit rester particulièrement petite pour les chaudières tubuleuses, parce que la différence des températures, dans les branches du circuit, ne peut guère dépasser 5 degrés, la circulation une fois bien établie. En supposant T—t égal à 5 degrés, on trouve :

$$p = 0{,}0003\ h.$$

126. — *Effet de la production des bulles de vapeur.* — La véritable cause du mouvement est l'entraînement produit par les bulles de vapeur dans la partie ascendante du circuit.

Une bulle de vapeur de poids spécifique δ s'élèverait dans un liquide de poids spécifique Δ, si elle n'éprouvait pas de résistance à son mouvement, en vertu de l'accélération W déterminée par l'équation:

$$\frac{\delta}{g} W = \Delta - \delta, \tag{1}$$

dans laquelle δ est négligeable dans le second membre, en présence de Δ. On a donc :

$$W = g \frac{\Delta}{\delta}. \tag{2}$$

Or, pour une température de 187 degrés et une pression de 12 kilogrammes, par exemple, on a:

$$\Delta = 0{,}887,$$
$$\delta = 0{,}006,$$
$$W = 1440^{m}.$$

La résistance du liquide arrête dès le début l'effet de cette énorme accélération, et limite la vitesse relative des balles dans l'eau à celle d'un mouvement uniforme très lent.

Considérons des bulles de diamètre D, animées dans l'eau d'une vitesse V, et éprouvant la même résistance R que des balles solides. La valeur de R, en fonction de la vitesse V, a pour expression approximative, jusqu'à preuve du contraire,

$$R = 50 \times \frac{1}{4} \varpi D^{2} \times V^{2}. \tag{3}$$

La poussée sur la bulle est exactement :

$$\frac{1}{6} \varpi D^{3} (\Delta - \delta). \tag{4}$$

Quand le mouvement est uniforme, la résistance est égale à la poussée, ce qui donne :

$$50 V^{2} = \frac{2}{3} (\Delta - \delta) D ;$$

ou, en donnant à $\Delta - \delta$ la valeur 881, puisque le mètre et le kilogramme sont pris pour unités dans la formule (3),

$$V^{2} = 11{,}75 D. \tag{5}$$

Les vitesses indiquées par cette formule sont faibles, quel que soit le diamètre des bulles, et restent insignifiantes en présence de la valeur indiquée par les observateurs pour la valeur des vitesses du courant général d'eau et de vapeur, dans les tubes des chaudières tubuleuses. Ainsi des bulles de 2 centimètres de diamètre auraient une vitesse relative de $0^m,48$, et des bulles de 2 millimètres de diamètre une vitesse relative de $0^m,16$, par rapport à l'eau. Les incertitudes sur la valeur exacte de la résistance R, n'infirment en rien les résultats généraux qui précèdent.

Il est intéressant de se rendre compte du volume de la vapeur, et du nombre correspondant des bulles, produits dans un tube. Les chaudières à circulation accélérée peuvent vaporiser 50 kilogrammes d'eau par heure et par mètre carré de surface de chauffe; cela fait $4^k,71$, ou $0^{m3},785$ de vapeur à 12 kilogrammes de pression, dans un tuyau de 3 centimètres de diamètre intérieur et de 1 mètre de longueur. Il se dégage donc, par seconde, dans ce tuyau, 52 bulles de 2 centimètres ou 52.000 bulles de 2 millimètres de diamètre.

Pour appliquer ces calculs au cas où la pression atteint 20 kilogrammes, valeur moyenne actuellement acceptée dans les chaudières tubuleuses, il faut réduire les chiffres relatifs au volume de la vapeur, dans le rapport 0,62. La valeur de $\Delta - \delta$ devient, en même temps, 877.

Les bulles animées d'un mouvement uniforme, qui subissent de la part de l'eau la résistance

$$\frac{1}{6}\,\varpi\,D^3\,(\Delta - \delta),$$

réagissent sur l'eau avec une force égale à cette résistance. L'ensemble de ces réactions, quelle que soit d'ailleurs leur répartition sur la totalité des molécules liquides, produit le même effet qu'une diminution de poids spécifique du liquide; une remarque très simple confirme ce qui précède et montre que la dépression hydrostatique, égale à la poussée des bulles, est bien égale à cette force totale de réaction.

Si, dans un vase cylindrique plein d'eau placé sur le plateau d'une balance, des bulles de vapeur viennent à se dégager, leur mouvement étant uniforme, le poids indiqué par la balance ne change pas. Le niveau s'est élevé de a en b, par suite du volume occupé par les bulles (fig. 148); la hauteur h est devenue h_1; en même temps le poids spécifique moyen δ est devenu δ_1. On a évidemment :

$$\delta_1\,h_1 = \delta\,h\,; \tag{6}$$

s'il y avait un orifice de sortie en a, la pression sur le fond aurait subi une diminution dans le rapport :

$$\frac{h}{h_1} = \frac{\delta_1}{\delta}.$$

De même dans un tube en U, dont une seule branche contiendrait des bulles (fig. 148 *bis*), le niveau monte de a en b dans cette dernière branche et ne change pas dans l'autre. Il y a équilibre, dans le bas du siphon, entre les deux pressions δh et $\delta_1 h_1$, si le tube est fermé, et écoulement en a sous l'action de la différence de pression :

$$h_1 - h = h\left(\frac{\delta}{\delta_1} - 1\right), \tag{7}$$

si le tube est percé en a.

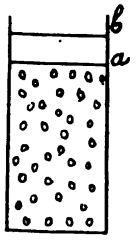


Fig. 148

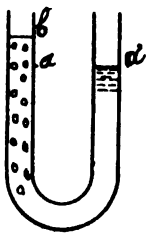


Fig. 148 *bis*

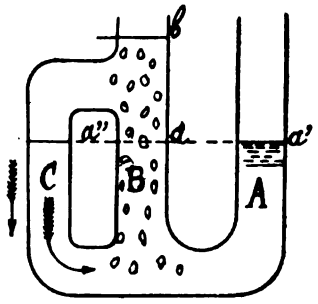


Fig. 149

Passons au cas où la circulation peut se produire dans le siphon renversé de la figure 148 *bis*, par la présence d'un tube de retour d'eau C non chauffé, appliqué sur la branche où les bulles se dégagent (fig. 149). Les deux branches C et A contenant de l'eau également dépourvue de bulles, le niveau d'équilibre au repos s'y établirait à la même hauteur, en a'' et en a', pour faire équilibre à la pression hydrostatique dans la branche B, où le niveau est en b. En vertu de la communication établie au sommet de B, la pression au bas de C sera accrue de la différence de charge $h_1 - h$; la circulation s'établira sous l'action de cette différence. La vitesse sera celle pour laquelle la résistance passive contrebalancera la charge $h_1 - h$.

La circulation s'établira de même, mais sous l'action d'une autre différence de niveau, si la branche B déverse l'eau dans la branche C, comme le représente la figure 150, disposition qui conduirait à un mouvement permanent.

L'écoulement se fera à l'extrémité du tube B, en raison de la différence de hauteur entre l'orifice et la position d'équilibre du niveau dans ce

tube; le niveau s'établira dans la branche C, de manière à contrebalancer la résistance passive qui correspond au débit ainsi déterminé.

Ce cas représente le fonctionnement de plusieurs chaudières, et en particulier de celle de M. Sochet, la première qui ait fonctionné à circulation accélérée.

Ce qui a été dit de la permanence des courants, produits par une différence de température initiale dans les deux branches d'un circuit *acb* (fig. 147), s'applique aux courants produits par l'entraînement des bulles de vapeur. Il faut supposer toutefois que la vitesse de l'eau est supérieure à la vitesse relative uniforme de la vapeur par rapport à l'eau, toujours dirigée de bas en haut; si cette condition n'était pas remplie, le mouvement pourrait se renverser.

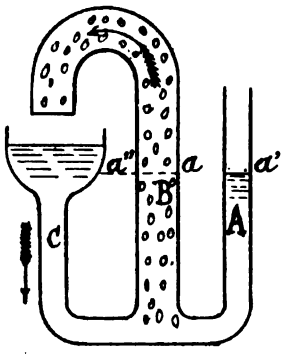


Fig. 150

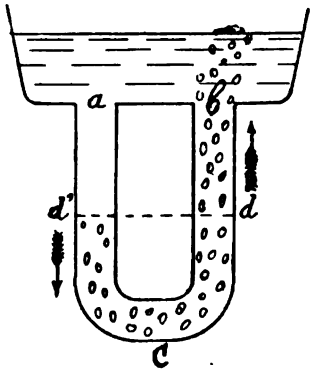


Fig. 151

Si donc nous reprenons le vase de la figure 147, et si nous chauffons la branche *cb* du tube *acb* en un point *d*, de manière à déterminer en ce point une formation de bulles de vapeur (fig. 151), le courant s'établit sous l'action de la poussée hydrostatique égale et contraire à la résistance exercée par l'eau au mouvement de ces bulles. Si le point *d* s'abaisse, le nombre des bulles contenues dans le tube augmente, et le mouvement s'accélère. Si le point *d* passe dans la branche de gauche, le mouvement se ralentit, sans changer de direction. Le mouvement sera identiquement le même, que le point de chauffe soit en *d'* ou en *d*. Enfin on accélèrera le mouvement, en ajoutant de nouveaux points de production de vapeur dans des positions quelconques.

Il est même à remarquer que le mouvement imprimé par des bulles de vapeur, produites en quantité constante, doit être plus permanent et plus uniforme que celui qui serait dû à une diminution du poids spécifique proprement dit de la colonne liquide qui s'élève. En effet, si un ralentissement vient à se produire, les bulles s'accumulent en quantité plus grande dans la colonne ascendante, et la différence de charge aug-

mente en même temps que les résistances passives diminuent, en vertu de la diminution de vitesse. Il y a donc deux forces en jeu, au lieu d'une, pour ramener immédiatement la vitesse de circulation à sa valeur normale.

127. — *Comparaison des effets de la vaporisation et de la dilatation.* — Le principe du mouvement d'entraînement de l'eau par les bulles de vapeur étant ainsi établi, la valeur de la charge d'eau, équivalente à l'action des bulles, peut se calculer d'une manière simple, en faisant sur la vitesse de circulation de l'eau des hypothèses qui n'ont rien d'invraisemblable.

Considérons de nouveau le tube de 3 centimètres de diamètre intérieur, vaporisant par heure et par mètre de longueur 785 litres de vapeur au poids spécifique de 0,006. Si le tube chauffé a deux mètres de longueur, il débitera $1^{m3},57$ de vapeur à l'heure par son orifice supérieur. Supposons maintenant que, pendant la chauffe, la vitesse du courant de circulation soit de 2 mètres, le débit total du tube est de $0^{m3},001414$ par seconde ou de $5^{m3},09$ par heure. Le mélange d'eau et de vapeur traversant l'orifice supérieur se compose donc, en nombres ronds, de 1 volume de vapeur et 2 d'eau, sur 3 volumes en tout. L'eau subit ainsi une réaction d'entraînement totale qui, à la partie haute du tube, atteint le tiers du poids spécifique de la colonne supposée vide de vapeur, c'est-à-dire à peu près mille fois plus que la dépression hydrostatique produite par un échauffement de 5 degrés.

Ce qui précède s'applique au cas où, au lieu de produire de la vapeur on insuffle les bulles de gaz au point *d* en quantité constante; c'est sous cette forme que M. Yarrow a pu faire quelques vérifications expérimentales. Les bulles de vapeur présentent la particularité de se condenser et de se régénérer partiellement, en montant et en descendant, à cause des variations de la pression.

Un cas spécial, où le mouvement est dû à la production des bulles de vapeur, et non à l'échauffement du liquide, est celui où le tube est d'assez petit diamètre pour que les bulles en occupent toute la section. La colonne liquide se brise alors (fig. 152) et le mouvement ascensionnel deviendrait impossible, contrairement au cas de la figure 148, s'il n'y avait pas de tube de retour. En supposant la circulation établie, la dépression produite se retrouve égale, comme précédemment, à la diminution du poids spécifique moyen de la colonne ascendante; seulement cette dépres-

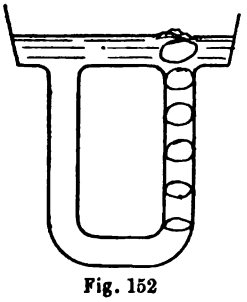


Fig. 152

sion s'exerce plus visiblement, au lieu d'être la résultante d'actions hydrodynamiques complexes. La résistance passive et, par suite, les lois du mouvement seraient d'ailleurs très différentes de celles correspondant au cas de la figure 151.

128. — *Histoire des chaudières à circulation accélérée. Chaudière Sochet.* — Quand un système nouveau d'appareils vient à prendre subitement une grande extension, il est assez habituel qu'on découvre, dans un passé lointain, des précurseurs autrefois dédaignés. Semblable circonstance n'a pas manqué de se présenter ici. Dès 1827, il existait

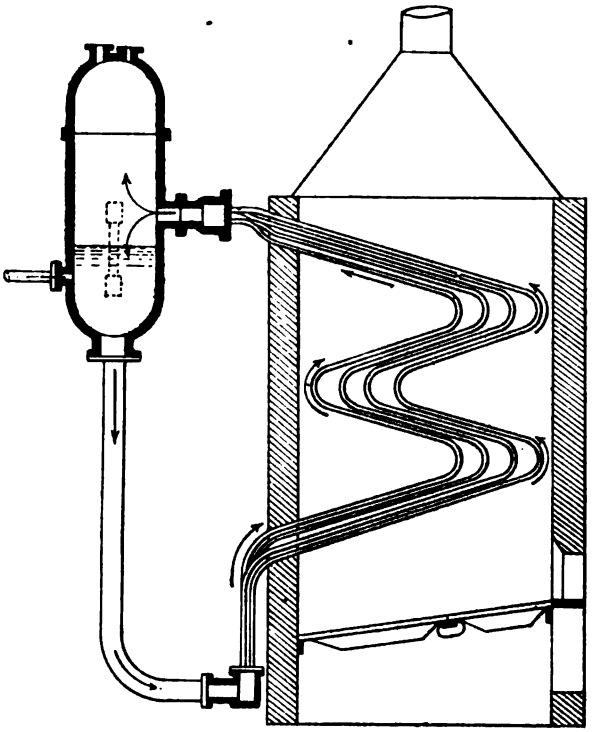


Fig. 153

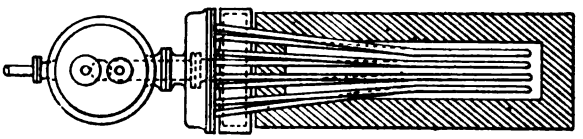


Fig. 153 *bis*.

une chaudière tubuleuse, exhumée dans le *Manual of naval engineering* de M. Seaton; elle était composée d'un réservoir de vapeur et de

deux réservoirs d'eau et de vapeur réunis par des tubes, dont l'ensemble offre une analogie frappante avec des appareils tout récents.

En réalité, l'introduction dans la marine des chaudières à circulation accélérée est l'œuvre de M. le capitaine de frégate Du Temple, devancé à Cherbourg par M. Sochet, directeur des constructions navales. M. Sochet s'était proposé nettement pour but de réaliser une chaudière *à circulation rapide;* c'est le nom même qu'il donnait à l'appareil. Il avait en vue, non pas de prévenir la formation de poches de vapeur aux chauffes intenses, dont il n'était pas alors question, mais de s'opposer au dépôt des masses calcaires dures et adhérentes sur les surfaces de chauffe. Les sels marins, précipités à l'état pulvérulent, devaient être entraînés par le courant circulatoire, et abandonnés au passage dans un déjecteur; on les aurait retirés de là en faisant extraction. Il s'agissait, comme on le voit, de résoudre le problème des chaudières marines à haute pression, à l'époque où les condenseurs étaient à injection.

La chaudière Sochet, imaginée en vue du service à bord, ne fut essayée qu'à terre, pour un moteur d'atelier. La figure 153 en donne la disposition générale, qui satisfait exactement aux principes aujourd'hui suivis. La circulation est complète; la production de la vapeur se produit au milieu du courant ascendant; le retour d'eau se fait par un gros tuyau placé à l'extérieur. On remarquera que le dégagement de la vapeur se fait au-dessus de l'eau dans le réservoir, comme dans les chaudières Thornycroft actuelles.

La chaudière Sochet fonctionnait à 5 kilogrammes de pression, et vaporisait $7^{k},35$ d'eau par kilogramme de charbon à une combustion de 75 kilogrammes de charbon par heure et par mètre carré de grilles. La surface de grilles était de $0^{m^2},5$ et la surface de chauffe de 7 mètres carrés.

A l'époque où elle fut mise en service, la chaudière Sochet devait sembler d'un fonctionnement très délicat; elle n'avait pas, d'ailleurs, d'avantage marqué pour le service à terre; elle fut abandonnée vers 1859, et remplacée par une chaudière ordinaire. M. Sochet, que j'ai eu pour directeur en 1862, en parlait peu; je l'ai connue plus tard par le souvenir qui en avait été conservé à l'atelier des chaudières; le maître de l'atelier, M. Bigot, très habile praticien, se rendait bien compte des avantages d'une circulation rapide, pour les appareils légers, à faible volume d'eau. M. Du Temple ne paraît pas avoir connu directement les expériences de M. Sochet, mais ses premiers ouvriers avaient vu fonctionner la chaudière que nous venons de décrire, ce qui explique la similitude entre les serpentins de la figure 153 et ceux des premières chaudières Du Temple.

129. — *Chaudière Du Temple. Disposition primitive.* — En étudiant sa chaudière, le commandant Du Temple avait d'abord en vue la navigation aérienne ; il s'agissait pour lui de fournir la vapeur au moteur à hélice d'une sorte d'aéroplane, auquel il consacra toute sa fortune et une partie de sa vie, particulièrement vers 1876, après qu'il se fut retiré de la carrière politique. L'aéroplane vola peu, mais la chaudière lui survécut ; elle fut appliquée d'abord en 1878 sur quelques canots à vapeur, ensuite sur des torpilleurs ; elle allait devenir, soit sous sa forme primitive, soit surtout après modification par plusieurs constructeurs, l'appareil le plus répandu pour l'emploi des grands tirages forcés, au moment où la mort vint surprendre son inventeur.

Dès le début, Du Temple donna à sa chaudière la disposition générale qui n'a pas varié depuis, et qui a été adoptée par la plupart des autres constructeurs. Deux petits réservoirs d'eau forment la partie inférieure à droite et à gauche du foyer. Le réservoir de vapeur est au-dessus, et porte le niveau de l'eau à peu près à mi-hauteur. Les faisceaux de tubes bouilleurs vont des réservoirs d'eau à celui de vapeur, et débouchent au-dessous du niveau. A l'avant et à l'arrière deux gros tuyaux, placés à l'extérieur, ramènent aux collecteurs inférieurs l'eau du collecteur supérieur, donnant un circuit complet de circulation. La figure 154 représente, en même temps que cet ensemble, les dispositions de détail, qui ont été adoptées pendant longtemps, et qui étaient encore celles des derniers brevets de l'auteur en 1890.

Les caractères distinctifs de la chaudière Du Temple proprement dite, comparée aux appareils plus perfectionnés qui l'ont suivie, sont l'emploi de tubes très contournés, dont la flamme vient successivement frapper les cinq replis, et celui de collecteurs inférieurs en fonte de fer à section rectangulaire. Le mouvement des gaz chauds se fait dans une direction très sensiblement verticale.

Au début, Du Temple tenait beaucoup à n'employer que des tubes de très petit diamètre, 10 millimètres environ, à parois très minces ; il y trouvait d'abord l'avantage d'une plus grande surface de chauffe, et, accessoirement, celui de pouvoir isoler un tube crevé en l'écrasant simplement avec une pince près de ses deux extrémités ; mais il fut obligé de renoncer lui-même à ce genre de tamponnage élémentaire. Les tubes des chaudières des torpilleurs n^{os} 130 à 144, commandées en 1889, avaient déjà 13 millimètres de diamètre intérieur et 17 millimètres de diamètre extérieur. Du Temple resta fidèle jusqu'au bout, aux collecteurs inférieurs en fonte, qui présentent sur leur face extérieure de nombreuses portes de visite.

Les inconvénients de la chaudière Du Temple, telle qu'elle sortit des

mains de l'inventeur, compromettaient principalement sa durée. La circulation se faisait lentement, dans des serpentins très sinueux; de là danger de formation de dépôts, surtout dans les branches horizontales contiguës aux collecteurs inférieurs; de là aussi danger de chambres de vapeur. Dès qu'un serpentin commençait à s'obstruer, la circulation s'y ralentissait encore, les dangers augmentaient, et le serpentin était condamné à se brûler à brève échéance. Le *Dragon* donna lieu, en escadre,

Chaudière du **Dragon** (*à 5 replis*).

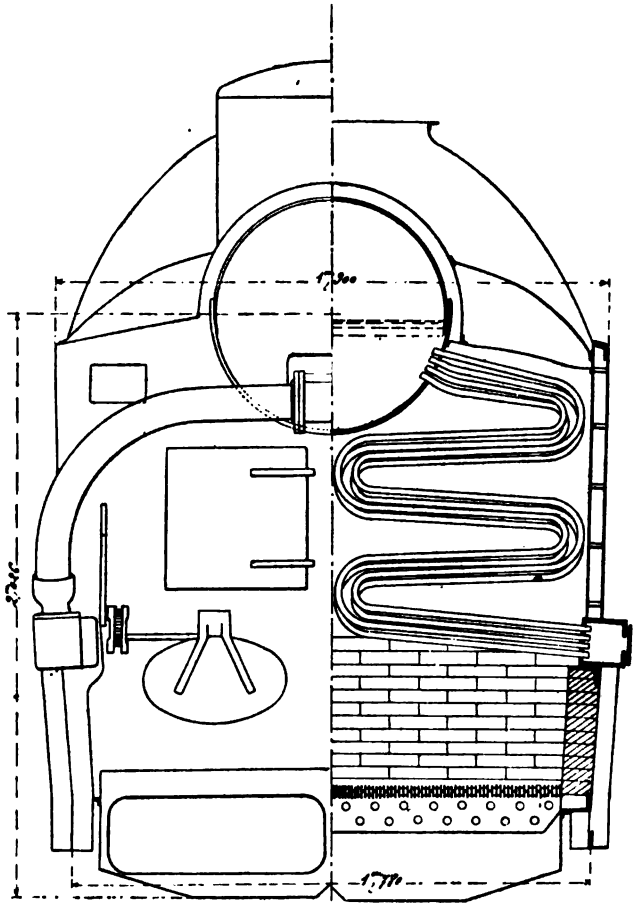


Fig. 154

à des plaintes assez vives sous ce rapport; les avaries se répétèrent surtout, d'une manière désolante, sur les trois torpilleurs 186, 190, 191, pendant le voyage qu'ils firent de Cherbourg à Toulon en 1895. Parfois, il faut le dire, les mécaniciens, encore novices dans la conduite des chau-

dières tubuleuses, ne prenaient pas assez de soin de la pureté de l'eau alimentaire, et ne veillaient pas assez attentivement aux niveaux. L'avarie de la chaudière de l'*Averne*, dont les serpentins furent entièrement fondus à la partie inférieure, pendant un voyage de Cherbourg à Brest, ne s'explique que par un défaut prolongé d'alimentation.

On doit reprocher aussi, aux chaudières Du Temple primitives, l'exiguïté de la chambre de combustion qui se rapproche de celle des chaudières Belleville. Les gaz, incomplètement refroidis après avoir été imparfaitement brûlés, donnaient des panaches de flamme, aux grands tirages forcés. Toutefois, sous ce rapport, aussi bien que sous celui du rendement, les chaudières Du Temple n'ont pas eu d'infériorité marquée par rapport aux chaudières locomotives, lorsqu'elles ont remplacé ces dernières sur les torpilleurs.

130. — *Perfectionnements successifs de la chaudière Du Temple; chaudière Du Temple-Normand; chaudière Guyot* — La chaudière Du Temple a été l'objet de nombreux perfectionnements dont l'énumération constitue à peu près l'histoire de la chaudière à circulation accélérée elle-même. Quelques-uns de ces perfectionnements ont été introduits par les ingénieurs placés depuis 1890 à la tête de l'usine Du Temple ; les plus importants sont dus aux constructeurs qui se rallièrent successivement au nouveau système des chaudières, et en particulier à M. Normand ; ils ont été ensuite adoptés par l'usine Du Temple. M. Thornycroft fut le premier à appliquer, en Angleterre, les chaudières tubuleuses aux torpilleurs; on lui doit, je crois, l'invention des cloisons ou des écrans formés par des tubes rapprochés jusqu'à être jointifs ; dans son ensemble, la chaudière Thornycroft reste assez différente de tous les modèles Du Temple. M. Normand, dont la conversion au nouveau modèle, décida de son succès définitif en France, travailla d'abord en véritable collaborateur avec la maison Du Temple; la série des chaudières Du Temple comprend des modèles mixtes Du Temple-Normand, avant d'arriver au modèle actuel qui ne diffère guère, d'ailleurs, du modèle actuel Normand.

Comme il n'est pas possible de suivre l'ordre chronologique, nous citerons, en premier lieu, l'un des perfectionnements les plus récents de la chaudière Du Temple, l'abandon des collecteurs inférieurs rectangulaires en fonte de fer et l'adoption de collecteurs cylindriques en tôle. Indépendamment de leur infériorité comme pièces de construction, les réservoirs rectangulaires conduisaient à donner une forme très défectueuse aux tubes ; ceux-ci ont besoin d'être verticaux et non pas horizontaux, à leur emmanchement inférieur, afin de faciliter la chute des dépôts dans les réservoirs. Les collecteurs cylindriques se visitent par un trou d'homme unique sur la façade.

Le diamètre des tubes et la forme des serpentins ont subi de nombreuses modifications, toujours dans le sens de l'accroissement du diamètre et de la simplification de la forme.

Les chaudières des torpilleurs n^{os} 130 à 144 avaient encore, en 1889, des tubes de 17 millimètres de diamètre extérieur. Pour dix torpilleurs type 145, le diamètre fut accru, et rendu variable, 19 millimètres pour le repli inférieur et 24 millimètres pour les quatre autres; l'épaisseur était portée en même temps de 2 millimètres à 2^{mm},5; la variation de diamètre avait pour but de faciliter le dégagement de la vapeur des replis supérieurs. En 1893, le diamètre extérieur fut porté à 25 millimètres pour la partie inférieure et à 30 millimètres pour la partie supérieure, avec une épaisseur uniforme de 3 millimètres. Actuellement le diamètre est uniforme et égal à 35 millimètres.

Chaudière du **Chevalier** (*à 3 replis*)

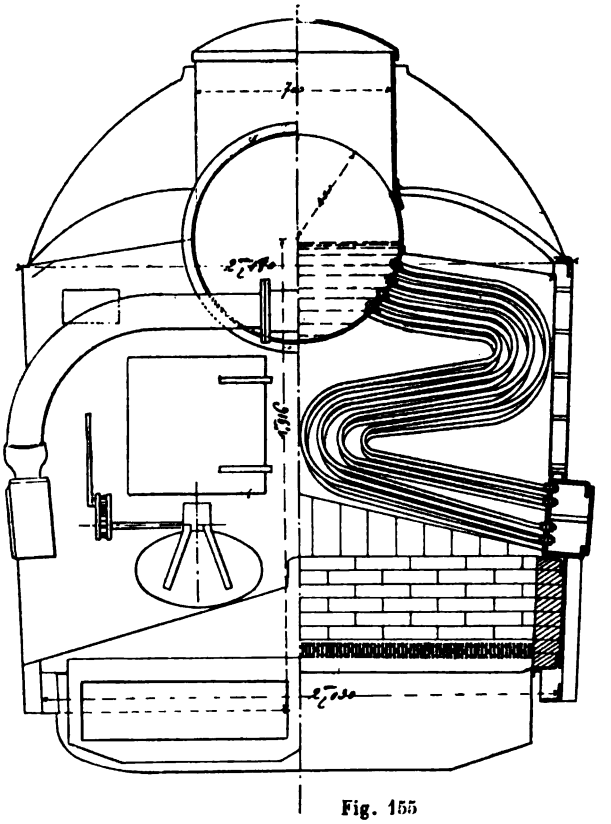


Fig. 155

La simplification de la forme des serpentins se rencontre pour la première fois sur la chaudière du *Chevalier*, représentée figure 155, dont

Chaudière du **Mangini.**

Echelle de 25 millim. pour 1 mètre

Coupe longitudinale

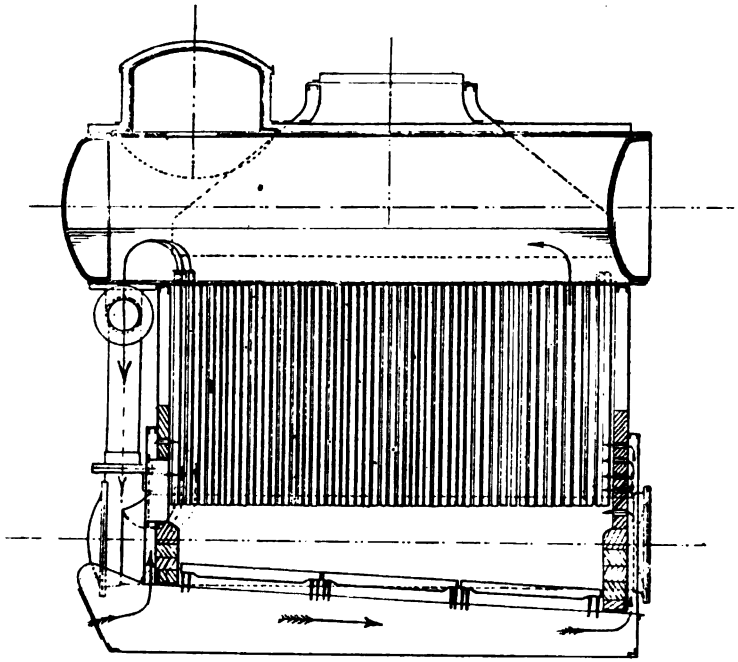


Fig. 156

Coupe transversale Vue de face

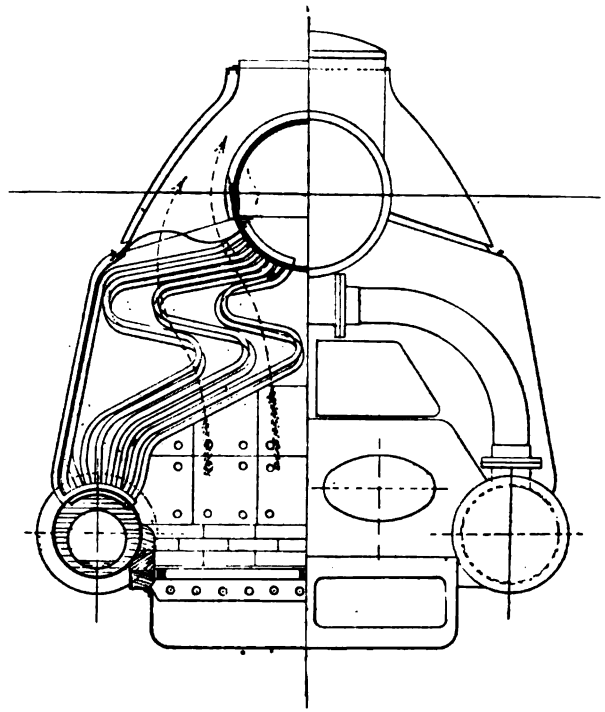


Fig. 156 *bis*

les tubes n'ont plus que trois replis au lieu de cinq; ce modèle, à 15 kilogrammes de pression, a eu d'assez nombreuses applications, *Lancier*, *Corsaire*, *Mousquetaire*, torpilleurs 145, 146, 154 à 159, 170 à 181, etc. La maison Du Temple est restée d'ailleurs fidèle jusqu'en 1896, aux tubes à trois replis, que le courant de gaz traversait toujours dans le sens transversal. Sur son dernier modèle de ce genre, qui est représenté figure 156, les inconvénients inhérents à cette forme, au point de vue de l'utilisation de la chaleur, sont très atténués; les serpentins en s'élevant verticalement au-dessus des collecteurs cylindriques, donnent une belle hauteur au fourneau; un écran partiel obtenu par le rapprochement des tubes oblige la flamme à se contourner dans le sens transversal; un écran en tôle placé sous la cheminée conduit la flamme vers les extrémités avant et arrière du faisceau tubulaire, afin de les chauffer aussi bien que la partie centrale.

Nous citerons, pour mémoire seulement, une autre disposition imaginée à l'usine Du Temple, dans laquelle les tubes s'entrecroisaient en forme d'X, partant d'un collecteur inférieur pour aller aboutir sur la face opposée du collecteur supérieur.

Actuellement, la maison Du Temple abandonne décidément les tubes à replis successifs et le trajet transversal de la colonne gazeuse, pour le modèle de chaudière à retour de flamme, dont la supériorité, au point de vue du rendement, paraît évidente. Les tubes entourent le foyer d'une véritable cloison; la combustion s'opère comme dans un foyer de chaudière cylindrique et même se développe plus largement; les gaz chauds revenant en sens inverse traversent longitudinalement tout le faisceau tubulaire avant de se rendre à la cheminée.

Les cloisons de tubes, à l'aide desquelles on sait aujourd'hui diriger à volonté les courants de flamme, dans les chaudières tubuleuses, et donner au besoin à ces chaudières une véritable enveloppe liquide, méritent quelques mots de description. Les tubes ne peuvent pas rester jointifs jusqu'aux collecteurs qu'ils découperaient complètement; on les forme avec deux rangées voisines que l'on ramène sur le même plan, aussi près que possible des deux collecteurs. Il reste ainsi, près des collecteurs, des vides triangulaires qu'il faut fermer, surtout à la partie supérieure, pour arrêter la flamme; l'obturation se fait avec une maçonnerie convenablement disposée ou avec un bourrage d'amiante. Dans la partie même où les tubes sont jointifs, un léger bourrage d'amiante est nécessaire pour obtenir une étanchéité convenable.

Cette disposition nouvelle des chaudières Du Temple, représentée figure 157, est celle que M. Guyot, ingénieur à Cherbourg a imaginée en 1893, quelques mois avant que M. Normand adoptât une circulation sem-

blable des gaz chauds sur les chaudières type *Aquilon*. Les données principales d'un appareil mis en construction à la fin de 1896, et destiné aux torpilleurs 206 à 211, sont les suivantes :

Surface de grilles	2^{m2},28
Surface de chauffe	105 mèt. carrés
Diamètre extérieur des tubes	26 millimètres.
Épaisseur des tubes	$2^{m}/^{m}$,5
Poids de la chaudière vide, cheminée et accessoires compris.	5800 kilog.
Poids de l'eau.	1450 »

Chaudière Du Temple-Guyot

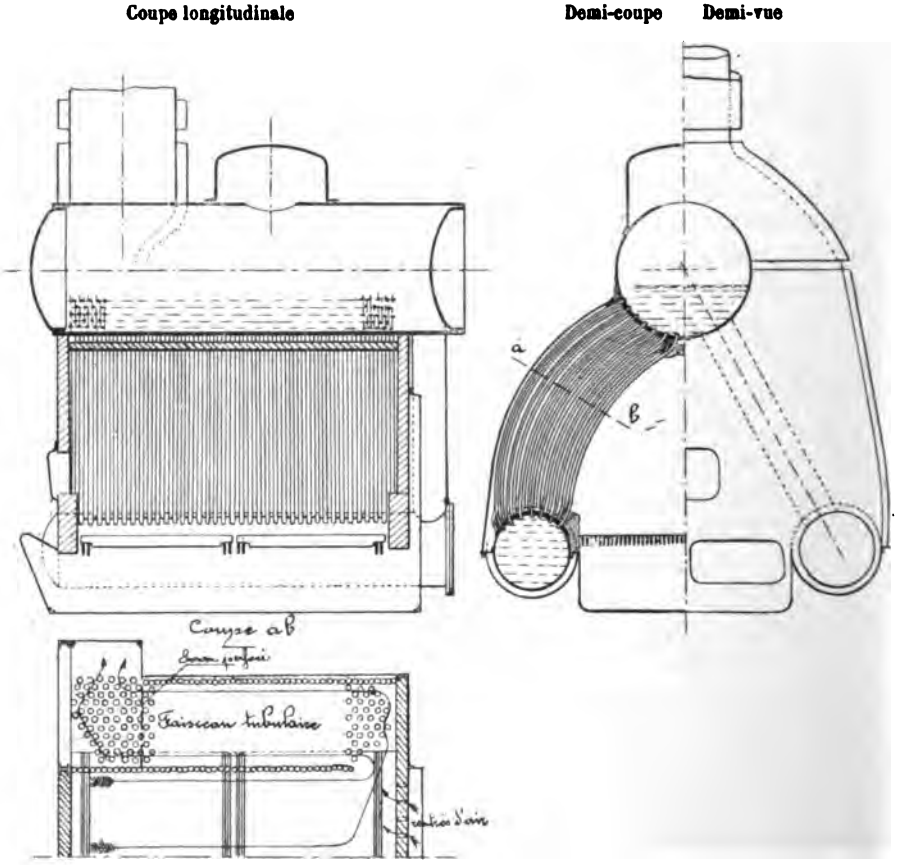


Fig. 157 et 157 *bis*

Un détail de construction, adopté dès l'origine, auquel la maison Du Temple reste fidèle, est le joint des tubes sur les collecteurs, opéré par

le serrage d'un cône par un écrou, comme l'indique la figure 158. Les mécaniciens des torpilleurs ont en général rendu un compte favorable de cette disposition, qui facilite les démontages et les remontages, et qui permet presque toujours de tamponner. L'inconvénient est d'augmenter le diamètre des trous dans les réservoirs, et par suite l'écartement des tubes d'axe en axe.

Emmanchement d'un tube dans le collecteur supérieur

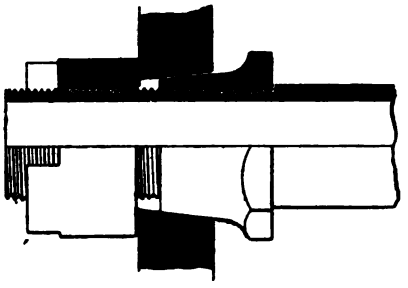


Fig. 158

Les cônes et les écrous étaient en laiton jusqu'à ces derniers temps; on vient d'adopter l'acier, pour écarter le danger des effets galvaniques. Les cônes d'acier, enfilés sur les tubes, se fixent sur eux par un simple dudgeonnage.

Ce système de joints a donné une preuve remarquable de bonne tenue, dans une avarie du collecteur supérieur du *Chevalier* en 1894, survenue évidemment à la suite d'un défaut d'alimentation. Ce collecteur a subi un élargissement permanent, dans la région d'aboutissement des tubes, et d'un côté seulement, de manière à présenter une poche longitudinale de plusieurs centimètres de flèche; tous les trous des tubes se trouvaient ovalisés, avec le grand axe dans le plan transversal du collecteur. Les cônes et les écrous étaient restés en place, et tous les joints avaient bien tenu.

131. — *Chaudières Normand.* — La part qui revient à M. Normand dans les perfectionnements successifs de la chaudière Du Temple, à partir de l'époque où il a commencé à la substituer sur ses torpilleurs aux chaudières locomotives, peut être constatée, en comparant les deux figures 155 et 159. Cette dernière représente la chaudière Du Temple, telle qu'elle a été construite par M. Normand pour le *Flibustier*, l'*Ariel*, les torpilleurs 186, 187, chaudière que l'on a appelé à juste titre Du Temple-Normand, et dont les modèles ultérieurs Du Temple, figures 156, 156 *bis* dérivent visiblement.

La suite de ses travaux, poursuivis avec l'esprit méthodique et le soin

du détail qui lui méritent sa haute réputation de constructeur, conduisit ensuite M. Normand à créer des modèles originaux, en conservant d'ailleurs la disposition générale Du Temple, en faisant quelques emprunts à M. Thornycroft, et en donnant enfin au courant de flamme la direction longitudinale.

Le premier soin de M. Normand fut de simplifier la forme des tubes en supprimant les derniers replis qui rappelaient encore la chaudière Sochet. Ses tubes n'eurent d'autre courbure que celle nécessaire, pour obtenir

Torpilleur 186

Chaudière Du Temple-Normand

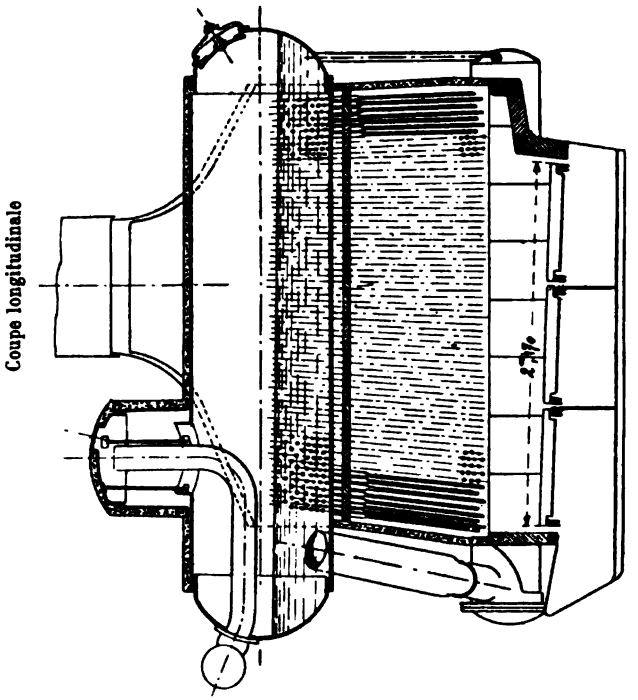


Fig. 159 *bis*

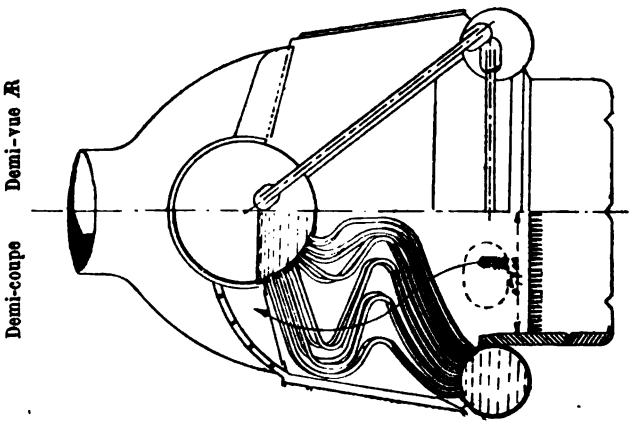
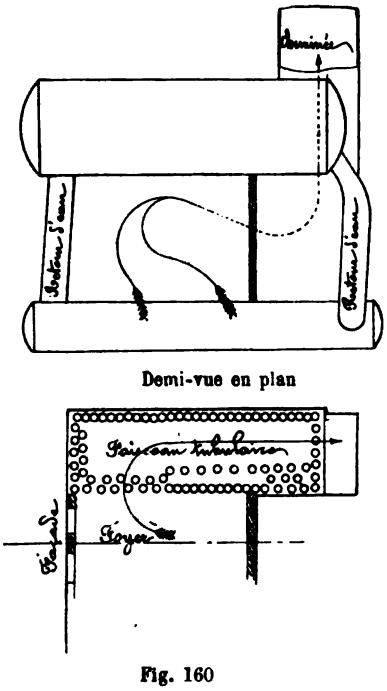


Fig. 159

l'aboutissement normal sur les réservoirs et pour laisser au faisceau l'élasticité qui parait être utile.

Pour donner à la flamme un parcours suffisamment long, dans le faisceau de tubes ainsi simplifié, M. Normand la dirigea dans le sens longitudinal. Il imagina à cet effet, en 1890 et en 1893, deux dispositions différentes, applicables aux deux positions que peut occuper la cheminée et représentées figures 160 et 160 *bis*.

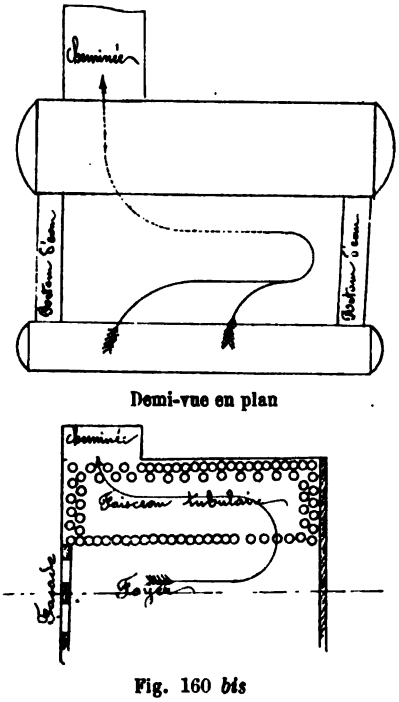
Forban



Demi-vue en plan

Fig. 160

Aquilon



Demi-vue en plan

Fig. 160 *bis*

Quand la cheminée est du côté de la façade, comme sur l'*Aquilon*, les flammes vont jusqu'au fond de la chaudière, s'y distribuent latéralement de part et d'autre, puis reviennent vers la façade, à travers les tubes, par un parcours analogue à celui suivi dans les chaudières tubulaires type marin; elles s'échappent par deux boites à fumée appliquées latéralement contre la chaudière. La chaudière est alors dite *à retour de flamme*.

Quand la cheminée est du côté du fond, comme sur le *Forban*, les flammes, arrêtées à l'arrière de la grille par un autel en maçonnerie formant écran complet, reviennent vers la façade, s'y distribuent latéralement et parcourent tout le faisceau, comme dans le cas précédent, pour gagner la boite à fumée; cette boite est appliquée sur le fond, et divisée

en deux parties correspondant aux deux faisceaux tubulaires. La chaudière est alors dite *à flamme directe*; mais c'est une appellation toute

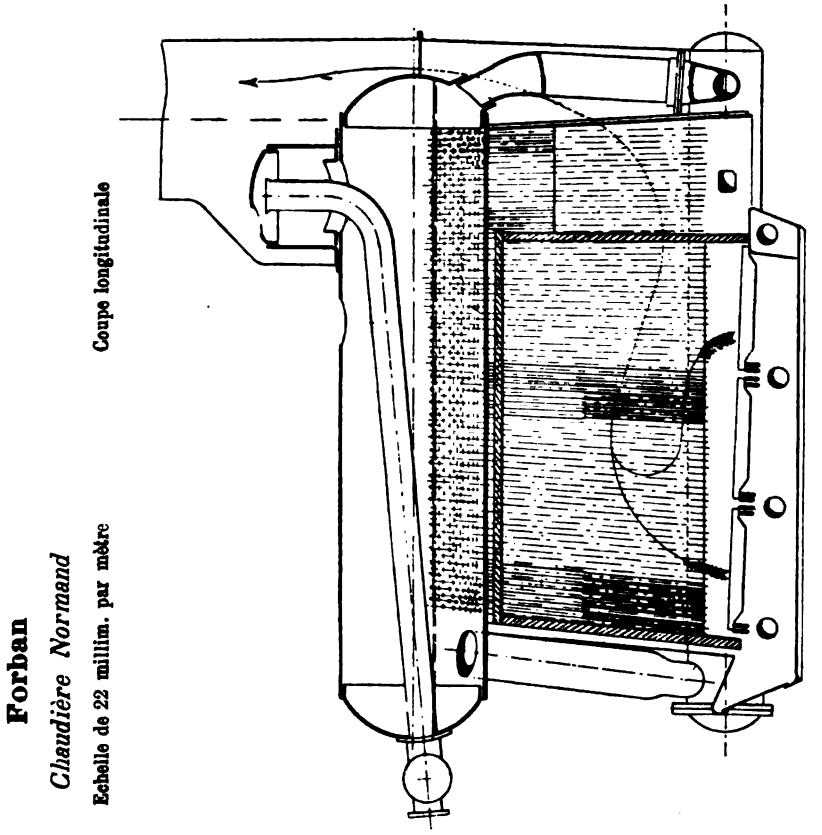


Fig. 161 *bis*

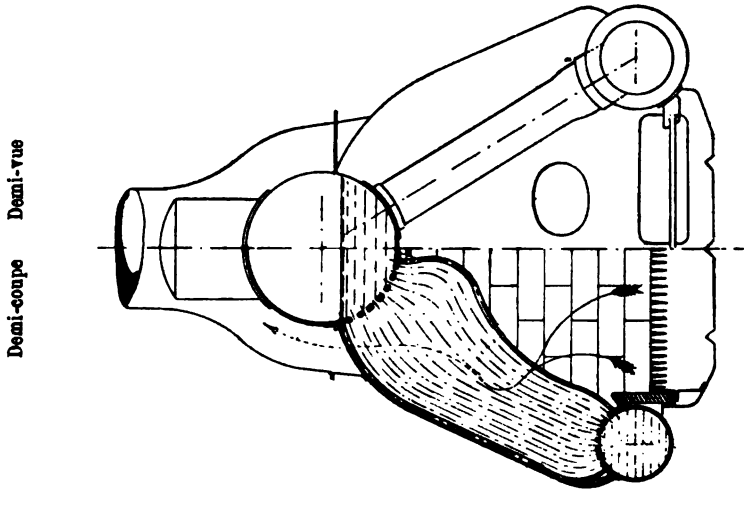


Fig. 161

conventionnelle. Il y a, en réalité, retour de flamme dans les deux cas; mais le retour est plus ou moins complet, et sa direction est différente. En d'autres termes la chaudière est toujours la même, mais la position des portes de foyers et de cendriers est différente.

M. Normand préconise à juste titre la disposition à retour de flamme.

Dans la figure 161, la coupe transversale s'applique aux deux modèles et la coupe longitudinale au modèle à flamme directe, qui est plus compliqué et plus difficile à bien comprendre sur les plans.

Les tubes des rangées extérieures sont jointifs, et ils forment un écran préservant l'enveloppe et renfermant tout le courant de flamme.

Parmi les dispositions prises pour diriger le courant de flamme, quelques-unes méritent d'être citées.

Les tubes intérieurs des deux bords se rapprochent les uns des autres avant leur aboutissement au collecteur supérieur, et forment une sorte de voûte, que l'on complète avec une file de briques réfractaires façonnées, reposant simplement sur les tubes. Cette maçonnerie élémentaire suffit, pour fermer à la flamme les passages triangulaires signalés plus haut.

Les flammes, à la fin de leur trajet longitudinal, avant d'arriver aux boîtes à fumée, rencontrent, à la partie supérieure du faisceau tubulaire des écrans en tôle, appelés autels renversés par M. Normand; ces écrans les obligent à redescendre dans le bas du faisceau, au lieu de s'échapper directement par le haut. Dans les chaudières à flamme directe (fig. 161), les écrans sont situés par le travers de l'autel en maçonnerie, qui forme le fond du foyer entre les deux faisceaux de tubes.

Les parties de la surface intérieure du faisceau de tubes, qui servent d'entrée aux gaz venant de la grille, sont formées naturellement de tubes non jointifs appartenant à deux files qui ne se rejoignent que sur le périmètre des passages à encadrer. De plus, dans la section des passages, le diamètre des tubes est légèrement réduit.

Ces détails montrent les soins pris pour obtenir un fonctionnement commode et une bonne utilisation. Il y en aurait d'autres encore à noter. Ainsi, les arrivées d'air au-dessus des grilles, se font à la fois par le fond et par la façade. Sur le fond, les ouvertures sont pratiquées à travers l'autel qui ferme le foyer; c'est pour ce motif que, dans les chaudières à flamme directe, l'espace situé en arrière de cet autel est isolé de la flamme, et que la boîte à fumée est divisée en deux parties placées dans le prolongement des faisceaux de tubes. L'air admis par la façade subit un réchauffage préalable dans une double enveloppe de la chaudière.

Les dispositions actuelles n'ont pas été arrêtées du premier coup; il y a eu, surtout vers 1894, une période de tâtonnements, pendant la-

quelle M. Normand fit des études et des expériences qui sont intéressantes à rappeler.

M. Normand avait fait en cuivre les tubes de ses premières chaudières, afin d'accroître les garanties de durée. Le cuivre rouge avait été adopté pour toutes les files extérieures, et le laiton pour les trois rangées voisines du foyer. Ces métaux donnèrent des mécomptes. Les tubes en laiton en particulier sont, d'après leur mode de fabrication, remplis de criqûres, qui ne se révèlent pas quand la pression s'exerce par l'extérieur, mais qui rendent ces tubes impropres à subir la pression par l'intérieur. Actuellement, M. Normand fait uniquement emploi de tubes de fer, qu'il préfère à ceux d'acier.

Au début, M. Normand avait rencontré des difficultés pour obtenir une surface de chauffe suffisante. La grande diminution de longueur des tubes résultant de la suppression des replis obligeait à accroître beaucoup leur nombre. La place manquait pour les aboutissements sur le réservoir supérieur, que M. Normand tenait à placer au-dessous du niveau de l'eau, contrairement à la pratique suivie par M. Thornycroft. Les aboutissements des trois files extérieures furent établis au-dessus de l'eau, mais sans que la direction du tube descendit toutefois au-dessous de l'horizontale; il convenait en effet de conserver le remplissage d'eau complet sans chambre d'air, quand on met la chaudière en état de conservation. M. Normand avait cru devoir protéger, par une tôle formant écran, l'extrémité des tubes située au-dessus du niveau de l'eau; c'était une précaution peut-être superflue. Dans les chaudières actuelles, la longueur des appareils permet de placer un nombre de tubes suffisant, et tous les aboutissements sont au-dessous de l'eau.

Comme exemple de chaudières récentes, on peut citer celles du *Forban*, dont les données principales sont :

Surface de grilles	4^{mq},10
Surface de chauffe.	215 ,00
Diamètre extérieur des tubes	34 millimètres
Épaisseur des tubes.	3 »
Poids de la chaudière, avec les accessoires et la cheminée	12^{tx},400
Poids de l'eau.	3^{tx},165

La surface de 4^{mq},10 n'a pu être obtenue pour la grille qu'en portant la longueur à 2^{m},36. Une semblable longueur rend le travail de chauffe incommode, bien que la hauteur des fourneaux facilite le chargement du charbon, et elle exige des chauffeurs exercés. Quoi qu'il en soit, les essais ont donné des résultats très favorables ; dans la marche à 31^{n},02 de vitesse, on a pu soutenir une combustion de 312 kilogrammes par

heure et par mètre carré de grilles, en développant 511 chevaux par mètre carré de grilles. Les résultats des essais du *Forban* ont d'ailleurs été donnés au numéro 40, page 87, avec ceux du *Flibustier* et de l'*Ariel*.

132. — *Application des chaudières Normand aux grands navires. — chaudière Normand-Sigaudy.*

La chaudière des torpilleurs étant ainsi arrivée, par l'amélioration du modèle Du Temple, à un type d'une supériorité indiscutable, sinon définitive, il y a des avantages sérieux à en généraliser l'emploi. Sur les grands navires, on a, suivant les circonstances, à placer, tantôt des chaudières simples comme celles des torpilleurs, tantôt des chaudières à double façade qui donnent un léger bénéfice de poids et d'encombrement. La chaudière à double façade, que M. Normand a étudiée en collaboration avec M. Sigaudy de la Compagnie des Forges et Chantiers, se compose de deux chaudières Normand accolées dos à dos avec collecteurs communs.

Chaudières Sigaudy-Normand

Modèle à flamme directe

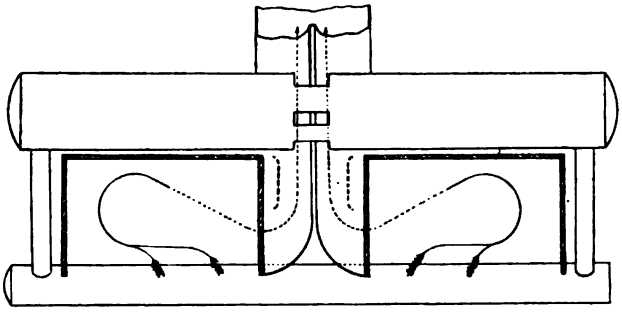


Fig. 162

Modèle à retour de flamme

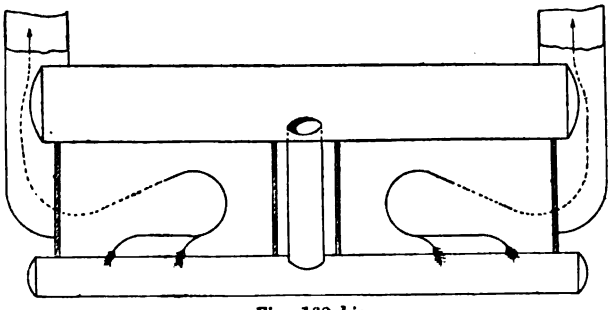


Fig. 162 *bis*

Les deux modèles, à retour de flamme et à flamme directe, donnent

naissance aux deux chaudières doubles, représentées figures 162 et 162 *bis*, d'après la première étude jointe à une demande de brevet. Ces figures sont suffisamment claires; elles montrent qu'il n'y a rien à ajouter à la description donnée pour les chaudières simples. Dans la chaudière à flamme directe (fig. 162), les boites à fumée aboutissent naturellement à une cheminée commune. Dans la chaudière à retour de flamme (fig. 162 *bis*), les boites à fumée se placent, soit sur la façade, soit contre les faces latérales, selon l'espace dont on dispose. Entre les deux autels, se trouve, dans tous les cas, une chambre vide, admettant l'air au-dessus des grilles.

La seule différence due au mode d'accouplement est dans la position des tubes de retour d'eau, réduits de moitié dans les deux cas. La chaudière à flamme directe a ses tubes de retour sur les façades; la chaudière à retour de flamme a les siens dans l'espace entre les deux grilles. Cette différence provient de ce que le collecteur supérieur de la chaudière à flamme directe porte un étranglement au milieu de sa longueur, afin de ne pas trop restreindre le passage des gaz dans la culotte de la cheminée.

L'emploi des doubles façades n'offre pas autant d'intérêt, avec les chaudières tubuleuses, qu'avec les chaudières cylindriques, parce que l'économie de poids réalisée est beaucoup moindre. D'autre part, cet emploi est sans inconvénient; les deux parties de la chaudière ont, dans tous les cas, des cheminées distinctes et elles pourraient même marcher à des tirages diflérents. Il y aura quelques précautions à prendre, pour empêcher les dénivellations excessives au roulis, dans des collecteurs de 6 mètres de longueur. Il y aura quelques détails de construction à soigner. En somme le succès de l'application des chaudières genre Du Temple aux grands navires dépend de la solution de problèmes généraux, tels que celui de la régularité de l'alimentation, les mêmes pour tous les systèmes de chaudières tubuleuses.

Comme exemple de chaudières à double façade, la figure 163 représente celles adoptées par la *Jeanne-d'Arc* à la fin de 1895 et mises en construction à Indret.

133. — *Chaudière Leblond et Caville.* — MM. Leblond et Caville, constructeurs à Cherbourg, auteurs d'un système de chauffage au pétrole dont il a été question plus haut, ont inventé plusieurs modèles de chaudières, parmi lesquels celui représenté figure 164, qui est un dérivé de la chaudière Du Temple.

Le réservoir d'eau, unique, est placé derrière l'autel; le collecteur supérieur est sur la façade. La flamme traverse le faisceau en suivant le circuit indiqué par une flèche; une file de tubes jointifs, facile à distinguer sur la figure, l'oblige à descendre puis à remonter.

Chaudière de la **Jeanne-d'Arc**

Demi-coupe Demi-vue

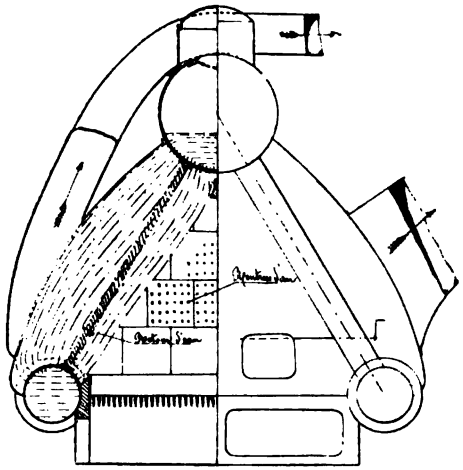


Fig. 163

Pression de régime	17k	
Nombre de corps	18	Rapports — à la surface de grilles
Longueur de la grille	2,070 × 2	
Largeur de la grille	2m,270	
Surface de grilles	9m2,3978	
Diamètre extérieur des tubes	0 ,030	
Diamètre intérieur des tubes	0 ,025	
Nombre de tubes	1994	
Surface de chauffe non mouillée	428m2,98	45m2, 646
Surface de chauffe mouillée	358 ,57	38 ,154
Surface d'évaporation	5 ,58	0 ,593
Section libre des cendriers	1 ,74	0 ,185
Section de passage des gaz entre les tubes	2 ,60	0 ,296
Volume d'eau	3m3,340	0 ,568
Volume de vapeur	3 ,740	0 ,398
Poids approximatif avec grilles et accessoires	29394k	
Poids total avec eau	35334	

Demi-coupe longitudinale Demi-vue

Fig. 163 *bis*

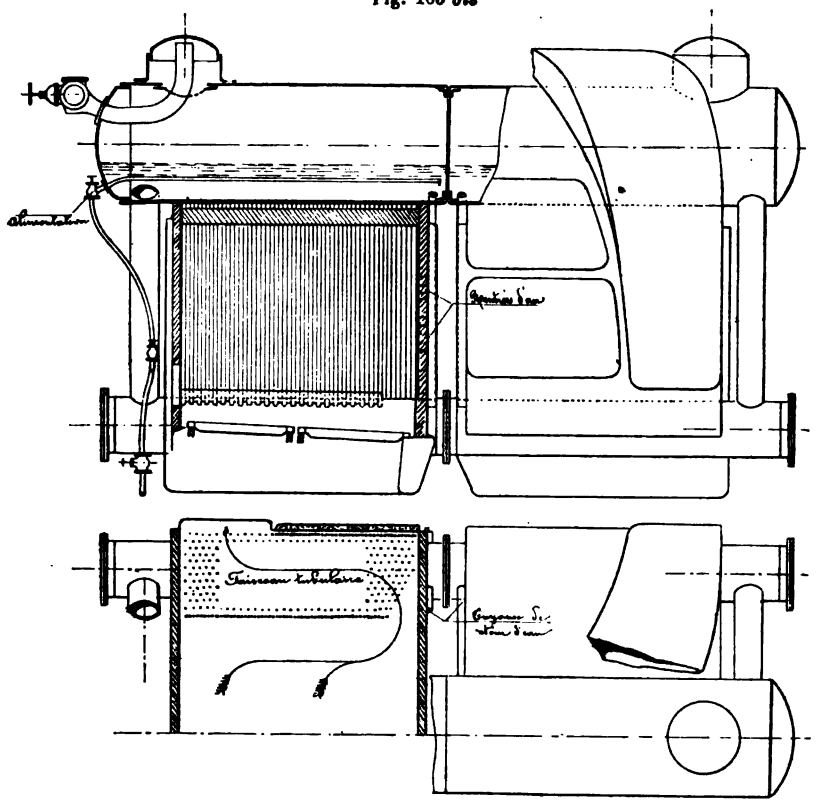


Fig. 163 *ter*

Le mouvement de retour de l'eau se fait par les tubes placés à la partie postérieure du faisceau. L'eau trouve ainsi des passages de descente sur toute la longueur du collecteur, ce qui doit faciliter son mouvement ; de plus, la suppression des tubes de retour extérieurs constitue une simplification.

Chaudière Leblond et Caville, modèle 1896

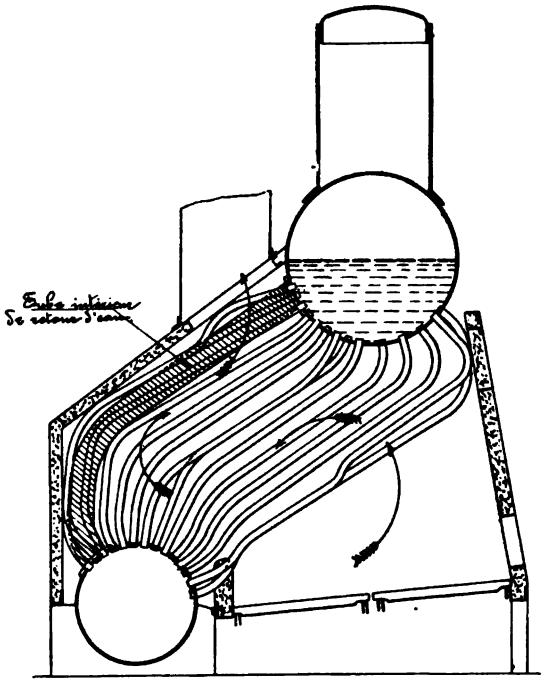


Fig. 164

134. — *Nouvelle chaudière D'Allest.* — M. D'Allest vient de créer, en 1896, un nouveau modèle de chaudière à circulation accélérée, dans lequel il a conservé quelques dispositions caractéristiques de sa chaudière à circulation libre.

Le réservoir d'eau est remplacé par une lame d'eau, qui est placée derrière l'autel et construite comme les lames têtières de l'ancienne chaudière D'Allest ; les tubes, de forme assez simple, vont de la lame têtière au collecteur supérieur établi sur la façade. Les tubes de retour d'eau A sont au-dessus du faisceau, en dehors de l'enveloppe de la chaudière ; ces tubes sont distribués sur toute la longueur, de manière à faciliter le mouvement de retour. La coupe transversale présente une analogie marquée avec celle de la chaudière Leblond et Caville ; mais la coupe longitudinale est à peu près celle de la chaudière D'Allest ordinaire. Il y a

deux grilles séparées par une chambre de combustion commune ; le courant de gaz se fait parallèlement à la façade ; les boites à fumée sont placées latéralement.

Chaudière D'Allest, modèle 1896

Demi-vue Demi-coupe *abcde* Coupe longitudinale

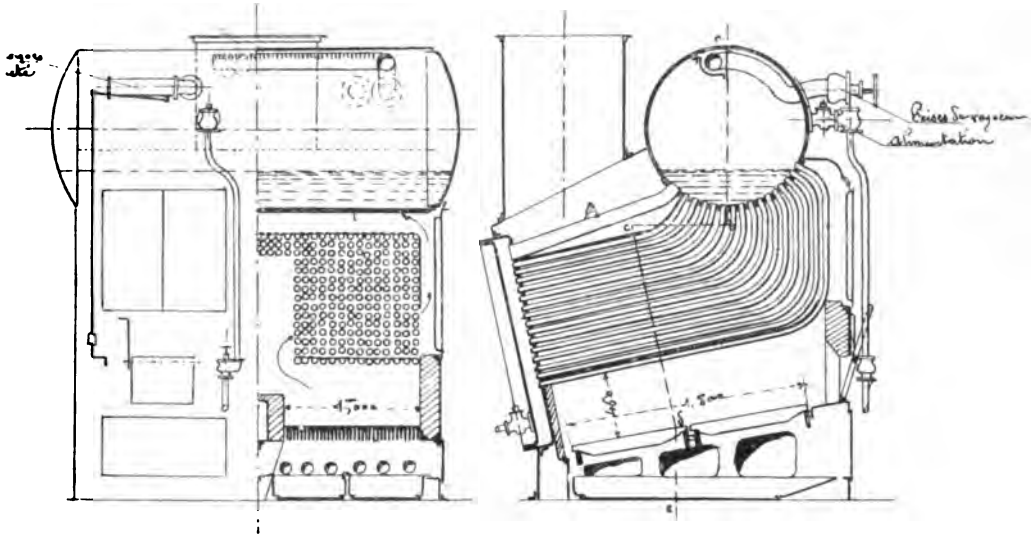


Fig. 165 Fig. 165 *bis*

Le nouveau modèle D'Allest n'a pas encore reçu la sanction de la pratique ; mais il bénéficie d'avance de l'expérience acquise par le constructeur. Ses dispositions sont simples, et paraissent heureusement combinées.

135. — *Adoption rapide des chaudières genre Du Temple.* — L'adoption presque générale des chaudières tubuleuses à circulation accélérée sur les torpilleurs a suivi de très près, dans tous les pays, la première réussite du modèle Du Temple en France ; en Allemagne toutefois la maison Schichau est restée plus longtemps fidèle aux chaudières de locomotives.

En Angleterre, où l'on avait pu conserver quelque souvenir d'un ancien modèle Goldsworthy-Gurney, breveté en 1827 (voir le *Manual of naval engineering*, de Seaton, 1895, p. 390), M. Thornycroft a devancé M. Normand lui-même dans la nouvelle voie ; il a été suivi de près par M. Yarrow. Beaucoup d'autres constructeurs ont suivi le mouvement. Quand l'Amirauté anglaise, qui n'avait pas donné jusque-là grand développement à sa flottille de torpilleurs, s'est décidée récemment à commander une centaine de contre-torpilleurs armés de torpilles, la construction des nou-

velles chaudières a reçu une impulsion très vive ; le nombre des modèles en service est devenu considérable.

Une étude complète de la chaudière à circulation accélérée actuelle, avec attribution à chaque inventeur de la part qui lui revient, dans les perfectionnements introduits depuis huit ans, serait aussi délicate à faire, que l'histoire des chaudières Belleville ou des chaudières Collet-Niclausse est, au contraire, simple et facile. Je me bornerai à des descriptions sommaires, extraites principalement des publications anglaises.

136.— *Chaudière Thornycroft.* — La chaudière Thornycroft est bien connue dans la marine française, par l'application qui en a été faite sur divers torpilleurs, le *Coureur* construit par M. Thornycroft, puis le *Véloce*, le *Grondeur*, les numéros 164, 165, 166.

Chaudière Thornycroft

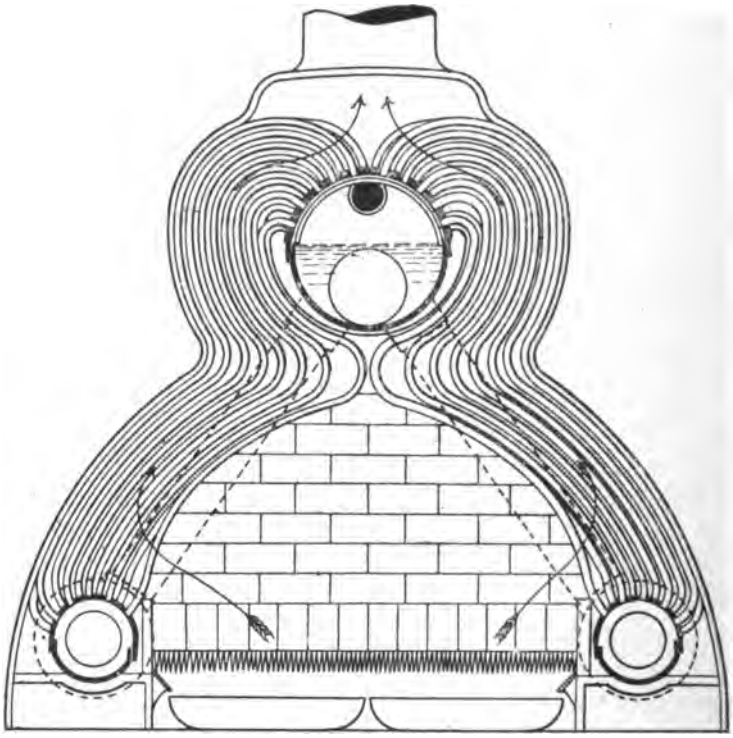


Fig. 166

La disposition caractéristique (fig. 166) est dans la forme des tubes qui sont très longs, et qui vont tous déboucher dans la partie haute du collecteur supérieur, au-dessus du niveau de l'eau ; à la partie inférieure,

les tubes se courbent, de manière à dessiner une voûte complète au-dessus du foyer.

Les tubes forment deux cloisons jointives à l'intérieur et à l'extérieur de chaque faisceau, en laissant de longs espaces triangulaires libres pour le passage de la flamme, dans le bas des cloisons intérieures et dans le haut des cloisons extérieures. Les gaz chauds suivent ainsi les tubes en les léchant sur toute leur longueur.

Cette disposition donne une surface de chauffe très grande, variant de 52 foisà 72 fois la surface de grilles, mais moins efficace, que si la flamme frappait les tubes au lieu de les suivre. En l'adoptant, et en y restant toujours fidèle, M. Thornycroft a plus particulièrement en vue un mode de circulation qu'il regarde comme très avantageux.

D'après des observations faites dans un collecteur muni de glaces, la colonne d'eau et de vapeur s'échappe dans le collecteur supérieur, d'un mouvement continu, à l'issue des siphons qui débouchent au-dessus de l'eau. Quand les tubes débouchent sous l'eau, le mouvement est au contraire alternatif; le dégagement d'une bouffée de vapeur est suivi d'une descente d'eau pour remplir le vide produit. De là résulte, en faveur du modèle Thornycroft, une diminution prononcée de la résistance à la circulation, malgré la petite perte de charge, égale à la hauteur entre l'orifice de chaque tube et le niveau dans le collecteur. D'après des mesures approximatives de la vitesse du courant dans les tubes de retour, M. Thornycroft considère que le poids d'eau en circulation est égal, dans sa chaudière, à 104 fois le poids d'eau vaporisée, tandis qu'il serait de 50 fois ce poids seulement, avec les tubes débouchant au-dessous de l'eau. Quoi qu'il en soit de ces chiffres, il est certain, tout au moins, que le mouvement est ascentionnel dans tous les tubes des faisceaux Thornycroft sans exception, et que le retour se fait entièrement par les gros tubes extérieurs. La chaudière Thornycroft réalise donc le mode de circulation Du Temple, plus sûrement que la chaudière Du Temple elle-même.

M. Thornycroft considère aussi le dégagement au-dessus de l'eau comme favorable au point de vue du danger d'entraînement d'eau. Sur ce point, la pratique n'a pas donné de conclusions précises. Les chaudières Du Temple et Normand priment peu. D'autre part, les chaudières Thornycroft ont donné des entraînements d'eau dans les essais du *Speedy*; ces entraînements ont été expliqués, il est vrai, par la mauvaise qualité d'une eau saumâtre employée à faire le plein. La séparation de l'eau et de la vapeur, sous l'arrivée des tubes dans le collecteur, est favorisée par le jeu d'un écran, à bords dentelés comme ceux des écrans du séparateur Bellevilie.

La crainte des coups de feu dans le haut des faisceaux, au-dessus du niveau dans le réservoir, a inspiré quelques préventions contre la chaudière Thornycroft. Cette crainte n'est pas fondée; en marche, l'eau est partout. Dans un accident du *Coureur*, tous les tubes ont fondu, à la partie supérieure; mais il y avait eu défaut évident d'alimentation, tout comme dans l'accident de l'*Averne*, où les tubes d'une chaudière Du Temple ont fondu à la partie inférieure. Un reproche plus fondé porte sur l'impossibilité de remplir d'eau alcaline tous les tubes, jusqu'en haut, sur la chaudière au repos, pour la mettre en état de conservation.

Les tubes sont en acier et tenus en place par un simple mandrinage, Ils sont entièrement zingués, dans un but de conservation. En service, le zinc disparait assez vite; sur le *Speedy*, on a remarqué que sa disparition coïncidait avec la présence d'un mélange détonant à l'intérieur de la chaudière vide; aucune explication n'a été fournie à ce sujet.

La galvanisation a l'avantage de rendre très apparents les moindres défauts dans le fer et l'acier, et de faciliter ainsi la visite des matériaux; ce serait une raison suffisante pour en justifier l'adoption.

Actuellement les tubes présentent une réduction de diamètre à la partie basse, afin de moins découper les tôles des collecteurs inférieurs.

Les chaudières représentées figure 166 ont été appliquées sur d'assez forts bâtiments, tels que le *Speedy* de 800 tonneaux, qui porte huit chaudières de ce modèle. L'expérience du *Speedy* a fait reconnaitre la convenance d'adopter des régulateurs automatiques d'alimentation pour les appareils à plusieurs chaudières accouplées. Le régulateur de M. Thornycroft est à contrepoids comme celui de Belleville, mais il est entièrement noyé dans le collecteur supérieur, ainsi qu'on le verra n° 175.

Les principales données concernant les chaudières du *Coureur* et du *Speedy* sont les suivantes :

	COUREUR	SPEEDY
Nombre de chaudières	2	8
Surface de grilles totale	7^{m2},08	18^{m2},95
Surface de chauffe totale	374 ,00	1367 ,50
Rapport des deux surfaces	52,8	72,10
Poids des chaudières vides	17^{tx},66	81^{tx},00
Poids de l'eau	3 ,60	12 ,97
Poids total	21 ,26	93 ,97
Poids total par mètre carré de grilles	3 ,00	4 ,95
Puissance maxima réalisée totale d'un essai	1528 chx.	4562 chx.
Puissance maxima réalisée par mètre carré de grilles	215 »	241 »

La plus grande puissance développée pendant un parcours, sur le *Coureur* a été de 241 chevaux par mètre carré de grilles, avec une combustion de 341 kilogrammes et une consommation de 1ᵏ,41 par cheval. Au tirage naturel, le *Coureur* dépense 0ᵏ,7 seulement de charbon par cheval. Sur les torpilleurs 164, 165, 166, on a limité la combustion à 250 kilogrammes, mais sans indice qu'il y eut danger à pousser les feux davantage.

En 1892, M. Thornycroft a imaginé pour ses chaudières une disposition nouvelle, destinée à faciliter leur groupement sur les bâtiments à plusieurs chaudières. Il en a fait les premières applications sur deux petits croiseurs danois le *Geiser* de 1.280 tonneaux, puis *Skjold* de 2.150 tonneaux; il l'adopte maintenant sur les contre-torpilleurs de 200 à 300 tonneaux *Daring*, *Desperate*, etc. qui lui sont commandés par l'Amirauté.

Les chaudières modèle *Geiser*, *Daring*, sont représentées figure 167;

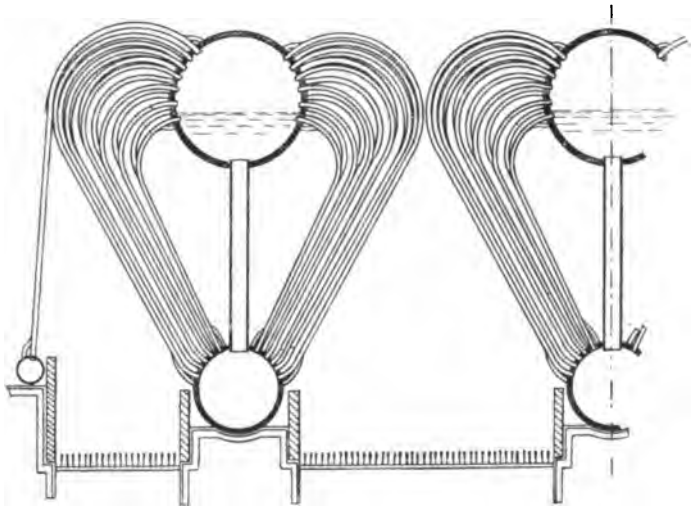


Fig. 167

elles forment des corps composés d'éléments distincts contenus dans une enveloppe générale unique. Chaque élément comprend deux collecteurs seulement, placés verticalement l'un au-dessus de l'autre, réunis par deux faisceaux de tubes disposés latéralement. Les tubes de retour sont distribués, sur toute la longueur, dans le vide compris entre les faisceaux, ce qui doit assurer une excellente circulation.

Chaque élément est ainsi chauffé par deux grilles, et chaque grille sert à deux demi-éléments. Les grilles des deux extrémités du corps, qui n'ont qu'un seul demi-élément à chauffer, sont de surface moindre, et leur foyer est fermé, du côté de la paroi latérale, par une cloison de tubes jointifs alimentés à la base par un collecteur minuscule.

L'accouplement ainsi réalisé sur le *Daring* donne une économie de poids, par rapport à une batterie d'éléments simples du modèle *Speedy*. Le fonctionnement est assez bon, pour que M. Thornycroft ait quelquefois construit des chaudières isolées, avec un seul élément du *Daring* à grilles doubles et à deux cloisons de tubes latérales. L'inconvénient, pour un corps composé, est qu'une avarie dans un élément, par suite de la rupture d'un tube, envoie de la vapeur dans tout le corps; tous les foyers communiquent, en effet, par la série des passages triangulaires du haut et du bas. Il faut donc vraisemblablement mettre bas les feux, dans tout le corps, pendant l'opération parfois assez longue du remplacement d'un tube crevé, De plus, il doit être difficile de n'allumer qu'une partie seulement des feux dans un corps, puisqu'un élément n'est alors qu'à moitié chauffé.

Les chaudières du *Daring*, composées de trois corps transversaux du modèle représenté figure 167, ont une surface de grilles totale de $17^{m^2},6$. La surface de chauffe est 42 fois la surface de grilles. Dans l'essai de vitesse, où le bâtiment a atteint 29 nœuds, on a marché à une pression d'air de 80 millimètres et développé 273 chevaux par mètre carré de grilles. Le fonctionnement a été trouvé satisfaisant.

Le *Desperate*, qui a également trois chaudières, a atteint la vitesse de $30^{n},03$, en développant 5.600 chevaux. A cette allure forcée, la consommation de charbon a été de $1^{k},3$ environ par cheval.

137. — *Chaudière Mosher et chaudière Symon-House, imitées de Thornycroft.* — Deux constructeurs ont seuls jusqu'ici suivi l'exemple de M. Thornycroft, en faisant déboucher les tubes au-dessus du niveau dans le collecteur supérieur. La chaudière américaine Mosher, représentée figure 168, se rapproche du modèle *Daring*, avec cette différence que l'on a une grille pour deux éléments, au lieu de deux grilles pour un élément. En cas d'avarie dans un des éléments, on peut continuer à chauffer l'autre, en se résignant à brûler le haut du faisceau du premier; cela n'est pas sans intérêt, pour les bâtiments à une seule chaudière.

Le fond du fourneau de la chaudière est fermé par une cloison de tubes, comme on le voit sur la figure.

La chaudière Mosher a été appliquée sur quelques yachts, et sur le torpilleur-vedette du cuirassé le *Maine*. L'auteur a fait connaître, au Congrès de Chicago, les résultats suivants, obtenus dans un essai de huit heures au tirage naturel, feux retenus, en brûlant du Pacahontas semi-bitumineux.

Charbon brûlé par heure et par mètre carré de grilles. .	34k,66
Eau vaporisée par kilogramme de charbon	9k,12
Air employé à la combustion, par kilogramme de charbon.	19ms,00
Température de la fumée à la base de la cheminée . . .	228°
Dépression à la base de la cheminée	7mm.6
Proportion d'eau entraînée, mesurée au calorimètre. . .	1,5 %
Proportion de cendres.	7 %
Quantité d'eau vaporisée dans les cendriers pendant toute la durée de l'essai	45 kilog.

Les données principales étaient :

Surface de grille	3ms,066
Surface de chauffes	102 ,9
Rapport de ces surfaces.	33,6
Charge des soupapes.	13 kilog.

Chaudière Mosher

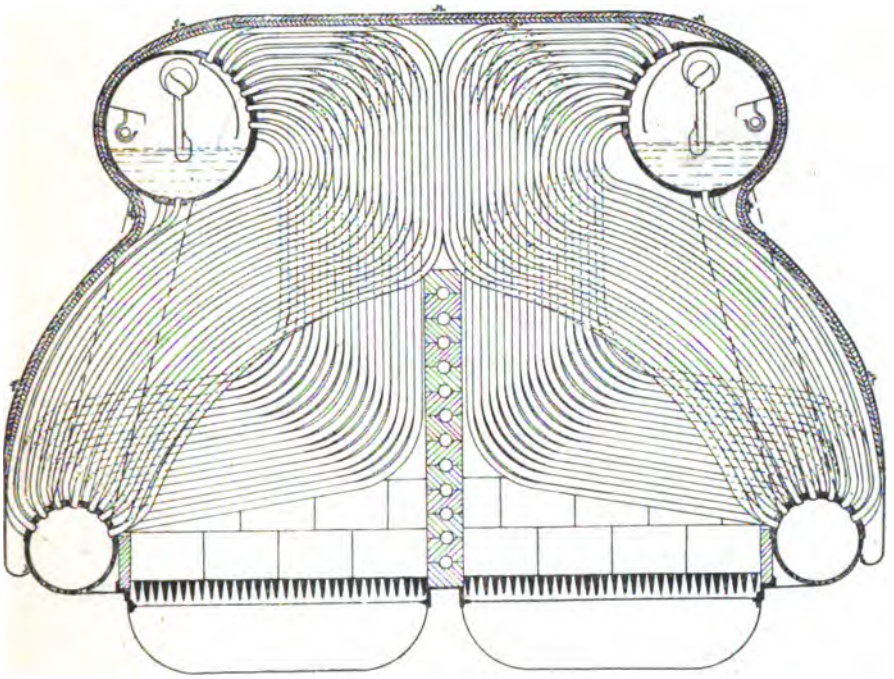


Fig. 168

Le détail des pertes de chaleur de cette chaudière a été donné plus haut, page 136.

La chaudière Symon-House, qui est un appareil spécialement destiné à l'emploi de la chauffe au pétrole sur les petites embarcations à vapeur, représente assez bien un des éléments du *Daring*, avec l'appareil de

chauffe placé entre les deux faisceaux tubulaires au lieu d'être en dehors. Les tubes, contournés en double S, sont frappés trois fois par la flamme.

La forme particulière du collecteur inférieur représenté sur la figure 169, a été adoptée pour le passage de l'arbre, la machine étant sur l'avant de la chaudière.

Chaudière Symon-House

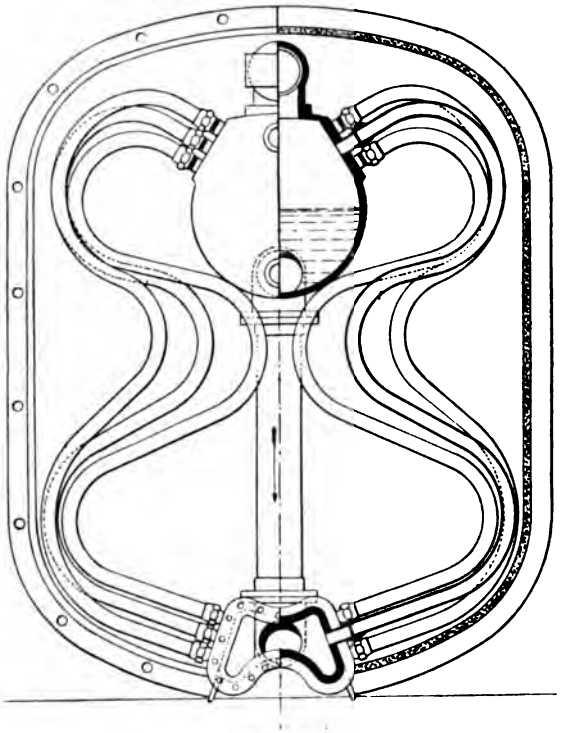


Fig. 169

Les tubes sont en cuivre rouge, ils font joint, non pas directement sur les collecteurs, mais bien sur des ajutages en métal delta, taraudés dans la paroi des collecteurs, comme le représente la figure 170. Le portage

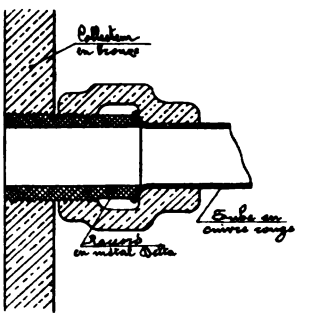


Fig. 170

a lieu entre deux surfaces coniques, serrées par un écrou creux. Ce mode d'assemblage rend les montages et démontages très rapides; la forme du collecteur inférieur ne se prêtait guère d'ailleurs à l'adoption des systèmes habituels de joints.

La chaudière Symon-House, pour une machine compound de 20 chevaux, pèse :

Sans eau ni accessoires.	108k.
Sans eau avec accessoires	136k
Avec eau et accessoires.	153k

C'est un peu moins de 8 kilogrammes par cheval.

138. — *Chaudière Yarrow.* — La chaudière Yarrow se présente, dans la longue série des appareils récents, plus ou moins dérivés de la chaudière Du Temple, avec des caractères propres, non moins originaux que ceux de la chaudière Thornycroft, mais d'une nature tout différente. Sa qualité distinctive est dans la simplicité, qui atteint l'extrême limite dont une chaudière tubuleuse est susceptible. La légèreté est également très grande.

Chaudière Yarrow du torpilleur C *en aluminium*

Echelle de 1/10

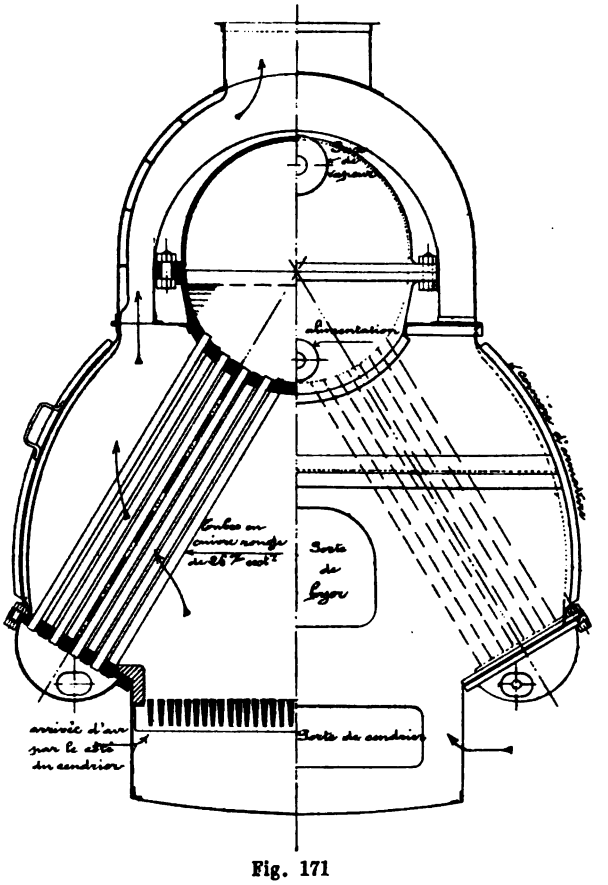


Fig. 171

La figure 171 représente la chaudière d'un petit torpilleur commandé par la Marine française pour la *Foudre*. Les tubes vont tous en ligne droite d'un collecteur à l'autre; ils aboutissent, dans le bas, sur une paroi plane très épaisse, dans le haut, sur une paroi cylindrique d'épaisseur renforcée, afin d'assurer la tenue des emmanchements. Les trois collecteurs sont en deux parties assemblées par un simple boulonnage

extérieur. Quand on enlève les segments qui ne reçoivent pas les tubes, tous les joints de tubes se trouvent accessibles à la fois. La visite et le nettoyage des tubes à l'intérieur se font avec une grande facilité ; dans une circonstance pressée, M. Yarrow a pu opérer le remplacement d'un tube en 40 minutes.

Lorsque les chaudières atteignent de grandes dimensions, le collecteur supérieur ne peut pas se construire comme pour les petits appareils ; le joint boulonné ne résisterait pas aux efforts de pression. Ce réservoir est alors en tôles rivées à la manière ordinaire ; il cesse d'être démontable ; mais alors son grand diamètre permet d'accéder facilement à l'intérieur pour les travaux de visite et de démontage.

La forme rectiligne des tubes simplifie beaucoup les rechanges et facilite les remplacements de tubes à bord.

Une autre simplification, apportée par M. Yarrow, a été la suppression des gros tubes de retour d'eau extérieurs. La circulation se fait entièrement par l'intérieur du faisceau, ce qui classe la chaudière Yarrow un peu en dehors du groupe des appareils à circulation accélérée, malgré les analogies évidentes avec la chaudière Du Temple et ses dérivées. M. Yarrow a été conduit à cette disposition par les curieuses expériences sur la circulation d'eau dont avons donné plus haut l'explication, nos 124 et 125 ; il a démontré que, pendant l'allumage, le mouvement doit se produire vers le haut dans certains tubes, vers le bas dans d'autres ; la circulation se maintient ensuite dans le même sens, d'une manière permanente, en vertu des lois de distribution des températures qui résultent du mouvement lui-même ; dès lors, les tubes de retour deviennent inutiles. Il importe de remarquer que les expériences de M. Yarrow et leurs conclusions ne sont applicables qu'à des tubes rectilignes, offrant peu de résistance au mouvement de l'eau.

M. Yarrow a fait varier plusieurs fois la matière de ses tubes. Au début, il les faisait en acier. Il a ensuite adopté le laiton, au moment où ce métal était presque universellement abandonné. Il se déclarait satisfait de cette substitution au commencement de 1894, parce qu'il avait pu se procurer des tubes en laiton d'une fabrication spéciale, exempts des criqûres signalées page 308. Depuis lors, il est revenu à l'acier, soit à cause de l'altération des qualités élastiques des alliages de cuivre aux hautes températures, soit simplement en raison de la différence de prix.

La grande objection aux chaudières Yarrow est l'absence de flexibilité dans les tubes, qui fait nécessairement travailler les joints, en cas d'inégalité de dilatation. M. Yarrow y répond, en affirmant que les joints, bien mandrinés dans des parois d'épaisseur renforcée, ne donnent jamais le moindre suintement. Il a fait subir à l'une des huit chau-

dières du contre-torpilleur le *Hornet,* avant son embarquement, l'expérience à outrance suivante. Poussant le tirage forcé à la pression d'eau de 89 millimètres, il a obtenu la mise en pression de la chaudière en 22 minutes; il a chauffé ensuite pendant 38 minutes ; puis il a mis bas les feux brusquement, en ouvrant à l'air froid toutes les portes de foyers et de cendriers. Il ne s'est manifesté aucune trace de fatigue. L'épreuve était sévère ; mais le refroidissement s'opérait de la même manière sur tous les tubes à la fois. Une présomption plus probante est l'extension de l'emploi de la chaudière Yarrow sur les nouveaux contre-torpilleurs anglais. Outre le *Hornet*, cette chaudière se trouve sur le *Charger*, le *Dasher*, le *Hasty*, commandés à M. Yarrow; elle a été adoptée par la *Earl's Shipbuilding C°*. de Hull pour le *Salmon* et le *Snapper*, commandés à cette compagnie.

La principale expérience faite jusqu'ici est celle du *Hornet*, sur lequel la chaudière Yarrow se trouvait en concurrence avec la chaudière Thornycroft, adoptée sur le *Speedy*. Les données principales de l'appareil du *Hornet*, que l'on peut comparer avec celles du *Speedy* indiquées plus haut, sont les suivantes :

Nombre de chaudières	8
Surface de grilles totale	15$^{m^2}$,31
Surface de chauffe totale.	763 ,28
Rapport des deux surfaces	49,8
Poids total, eau comprise.	43^t,8
Poids total par mètre carré de grilles	2 ,86

Pour compléter la comparaison avec les chaudières Thornycroft, il faut remarquer que, si la surface de chauffe est relativement moindre sur le *Hornet* que sur le *Speedy*, elle est au contraire plus grande que sur le *Daring;* par contre, l'avantage de légèreté est sans doute moindre, par rapport au *Daring* que par rapport au *Speedy*.

Après les chaudières Thornycroft et Yarrow, nous passerons plus rapidement sur les autres modèles anglais, d'introduction plus récente.

139. — *Chaudière Blechynden.* — Dans le modèle construit par M. Blechynden de Barrow-in-Furness, la facilité de démontage et de remplacement des tubes, demandée par M. Yarrow à la décomposition du collecteur supérieur en deux parties, est obtenue avec un réservoir supérieur entièrement rivé. Tous les tubes sont légèrement cintrés, suivant des arcs de rayon différent, qui convergent en un même point de la section du collecteur. En ce point, sont disposés, le long de la génératrice, des trous suffisamment rapprochés, par lesquels on peut retirer ou introduire les tubes. Chaque tube est ainsi indépendant des autres.

De même que dans la chaudière Yarrow, avec laquelle, du reste, la chaudière Blechynden offre de frappantes analogies, il n'y a pas de tubes extérieurs de retour d'eau; le mouvement de descente est supposé s'opérer par les deux rangées extérieures de tubes, qui forment l'écran jointif de préservation de l'enveloppe, et qui sont assez écartées du reste du faisceau.

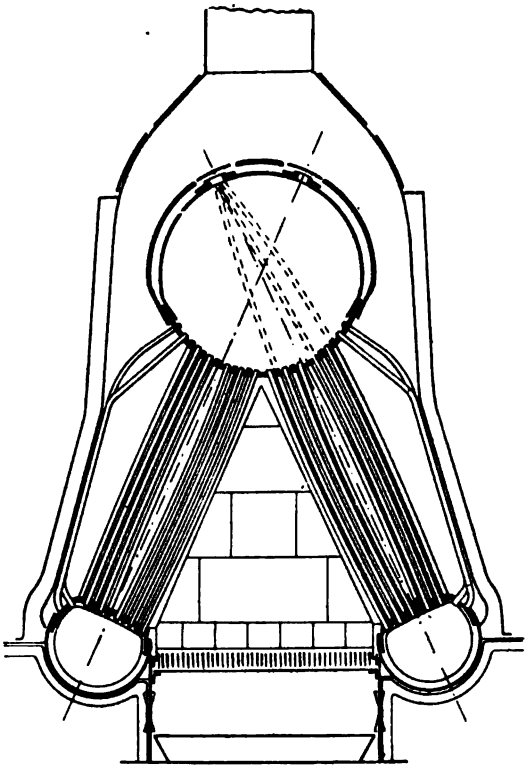


Fig. 172

Trois chaudières Blechynden ont été commandées par l'Amirauté pour des torpilleurs de première classe. Le modèle Blechynden est également adopté sur le *Sturgeon*, le *Skate* et le *Starfish* construits par la *Naval construction and armament C°* de Barrow et sur le *Sunfish*, l'*Opossum* et le *Ranger* construits par la maison Hawthorn-Leslie et C° de Newcastle, enfin, sur les deux croiseurs *Pactolus* et *Pomone*, de la classe *Pelorus*, dont les appareils sont construits par la maison Penn.

Le timbre des chaudières Blechynden les plus récentes est de 21 kilogrammes, pour une pression de 17k,5 à la machine ; cette chute de pression indique l'emploi d'un détendeur.

140. — *Chaudière Reed.* — La chaudière Reed (fig. 173), est, de tous

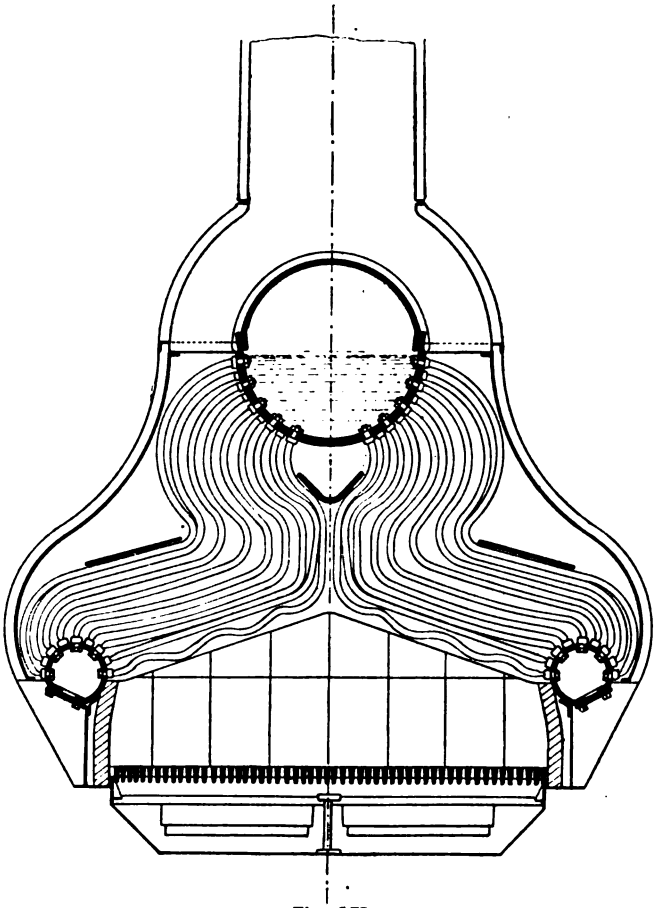


Fig. 173

les modèles anglais, celui qui se rapproche le plus du modèle Du Temple : mouvement transversal des gaz chauds; tubes débouchant au-dessous du niveau dans le collecteur supérieur; faisceau tubulaire contourné de manière à présenter encore comme un lointain souvenir des replis de Sochet. La file intérieure de tubes présente une forme ondulée peu favorable au dégagement de la vapeur.

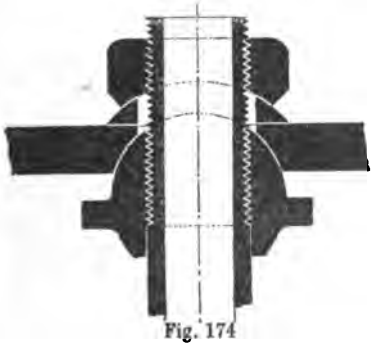


Fig. 174

Une autre analogie avec la chaudière Du Temple est dans l'adoption de joints de tubes serrés par des écrous (fig. 174); seulement le por-

tage, au lieu de se faire sur une surface conique et une surface plane, se fait sur deux surfaces sphériques qui permettent un certain mouvement angulaire des tubes par rapport aux collecteurs.

Les chaudières Reed sont adoptées sur plusieurs contre-torpilleurs anglais, le *Janus*, le *Lightning*, le *Porcupine*, le *Star*. Dans un essai de consommation à terre, au tirage naturel, elles ont vaporisé 12 litres d'eau par kilogramme de charbon, correction faite pour ramener l'eau et la vapeur à 100°.

141. — *Chaudière White.* — M. Samuel White, l'habile constructeur d'East-Cowes et l'inventeur des *turn-about*, a adopté un modèle de chaudière qui mérite d'être comparé à celui de M. Yarrow, si l'on veut mettre en parallèle les degrés extrêmes de complication et de simplicité, qui peuvent se rencontrer dans des appareils de système analogue.

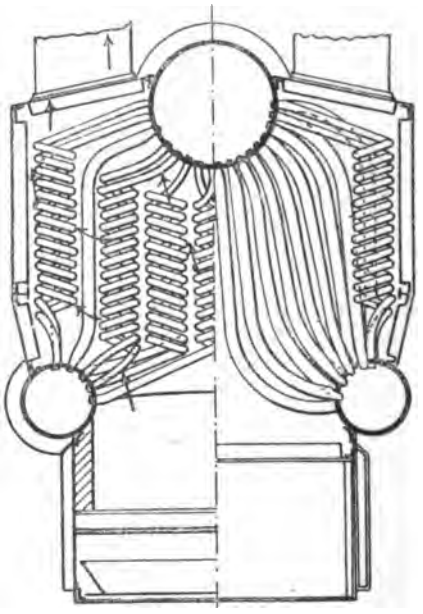


Fig. 175

Les faisceaux tubulaires établis entre les trois collecteurs comprennent des tubes de deux sortes, les uns gros et de forme simple, les autres petits et contournés en spirale. Les gros tubes, simplement façonnés en Z, et affilés à leurs extrémités pour ne pas trop découper les collecteurs, forment deux cloisons qui divisent le volume intérieur de la chaudière en trois parties. Dans le foyer central, les flammes s'élèvent verticalement; dans les deux carneaux latéraux, elles font retour pour

se rendre à la cheminée. Les petits tubes forment sept faisceaux hélicoïdaux, placés, cinq dans le foyer central, et un dans chaque carneau.

Le fond et la façade sont garnis par des écrans de tubes du gros modèle, à peu près jointifs, représentés sur le côté droit de la figure 175.

La chaudière White a été adoptée par l'Amirauté anglaise sur des torpilleurs de première classe.

142. — *Chaudière Fleming et Fergusson.* — Ce modèle (fig. 176) a été étudié spécialement en vue de l'application aux navires de commerce, sur lesquels les questions d'entretien et de démontage ont une importance capitale, et où l'on ne trouverait pas, autour des chaudières, les

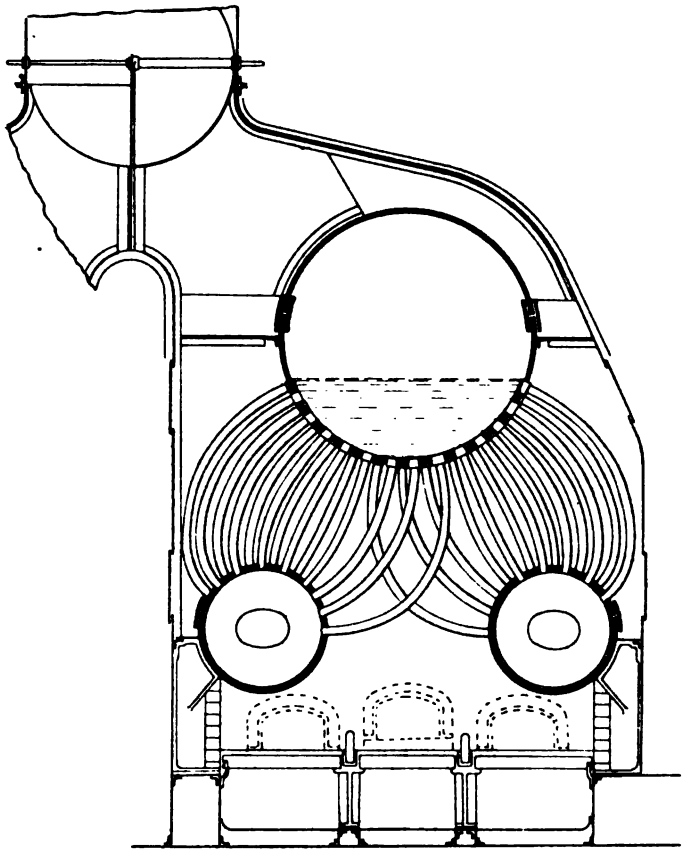


Fig. 176

espaces libres nécessaires pour retirer et introduire les tubes selon le système Blechynden. Afin de pouvoir faire l'opération dans la chau-

dière même, on a diminué la longueur des tubes et augmenté le diamètre du collecteur supérieur ; les tubes se manœuvrent ainsi à l'intérieur du collecteur.

En raison de son grand diamètre, un réservoir supérieur peut desservir plus de deux faisceaux de tubes. Les inventeurs ont étudié plusieurs modèles de chaudières présentant les grilles, tantôt en long, tantôt en travers, les uns à simple façade, les autres à double façade, dans lesquels un seul collecteur supérieur correspond, soit à deux, soit à trois, soit même à quatre collecteurs inférieurs.

Un caractère commun à tous les modèles est l'épanouissement des faisceaux à la partie supérieure, avec un écartement des tubes suffisant pour leur permettre de s'enchevêtrer comme l'indique la figure 176.

Voici quelques données relatives à trois modèles :

	CHAUDIÈRE à 3 foyers Fig. 176	CHAUDIÈRE à 6 foyers (double façade)	CHAUDIÈRE à 4 foyers transversaux
Surface de grilles	$4^{m^2},65$	$12^{m^2},82$	$15^{m^2},33$
Surface de chauffe	134 ,75	446 ,00	464 ,50
Rapport	28,98	34 ,79	30,30
Poids total, avec l'eau, sans la cheminée.	$30^{tx},500$	$76^{tx},200$	$111^{tx},700$
Pression de timbre	15 ,500	14 ,100	17 ,600

Le poids, égal à $7^{tx},5$ au moins par mètre carré de grilles, n'est pas inférieur à celui des chaudières locomotives ; c'est donc la supériorité du fonctionnement, non l'avantage de la légèreté, qui pourra déterminer l'adoption du modèle Fleming et Fergusson.

143. — *Chaudière Seaton* (deuxième modèle). — La longueur des tubes étant le principal obstacle au démontage, M.-A.-E. Seaton de Hull a imaginé de les diviser en deux parties par un réservoir intermédiaire, dans lequel on pénètre pour les enlever ou les mettre en place. La chaudière Seaton (fig. 177) présente la forme d'un X. Il y a deux réservoirs supérieurs et deux réservoirs inférieurs aux extrémités des branches ; le réservoir intermédiaire se trouve à leur intersection.

Les gaz chauds traversent successivement deux faisceaux de tubes ; dans l'intervalle ils lèchent le réservoir intermédiaire qui constitue un véritable bouilleur ; ils se rendent à la cheminée par l'intervalle assez resserré qui sépare les deux réservoirs supérieurs.

Les tubes extérieurs habituels de descente d'eau vont directement des réservoirs supérieurs aux réservoirs inférieurs. Une rangée de tubes jointifs, formant cloison de protection de l'enveloppe, monte de chaque côté, directement des réservoirs inférieurs aux réservoirs supérieurs; ces tubes, moins exposés du reste à la chaleur, ne jouissent pas des mêmes facilités de démontage que ceux des faisceaux principaux. Les deux réservoirs supérieurs sont réunis entre eux par des tuyaux transversaux.

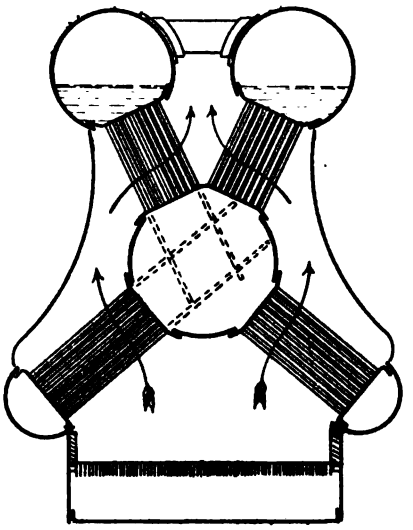


Fig. 177

La chaudière Seaton paraît devoir réaliser d'une manière très complète toutes les conditions pratiques d'un bon appareil marin, en ce qui concerne l'entretien et les réparations. La présence du réservoir intermédiaire rempli d'eau doit augmenter le poids d'une manière très notable.

144. — *Modèles divers.* — L'énumération déjà longue que nous venons de faire est encore incomplète. Il existe, dès à présent, plusieurs autres modèles de chaudières tubuleuses ayant eu des applications maritimes. La chaudière américaine Roberts, qui rappelle le premier modèle Du Temple avec ses replis, est en service sur un yacht. On parle d'une chaudière Petersen, construite à Milwall par M. Fraser, dans laquelle les collecteurs inférieurs et supérieurs portent des tubulures, de chacune desquelles part un petit faisceau de 16 à 17 tubes. On a ainsi 88 tubulures seulement, pour 1.476 tubes. Les premiers essais, faits à terre, ont paru satisfaisants.

Quelques dispositions originales sont en cours d'essai, notamment sur la chaudière Solignac, que son inventeur manifeste l'intention d'appliquer à la marine ; il existe plusieurs modèles intéressants de chaudières Solignac. Les tubes n'y sont traversés que par un faible courant d'eau s'y vaporisant entièrement; un jeu de soupapes dirige le courant. La disposition du faisceau tubulaire, qui se rapprochait d'abord du modèle Du Temple, rappelle plutôt maintenant le modèle Joessel-D'Allest.

En général, c'est toujours du côté du modèle Du Temple, plus ou moins modifié, que se dirigent les nouvelles recherches.

CHAPITRE XIV

AVANTAGES & INCONVÉNIENTS DES CHAUDIÈRES TUBULEUSES

Comparaison des différents modèles entre eux.

§ 1. — Avantages généraux des chaudières tubuleuses.

145. — *Avantages généraux et avantages particuliers à la marine.* — Parmi les avantages des chaudières tubuleuses, quelques-uns s'appliquent à tous les appareils marins ou terrestres indifféremment, et justifient l'adoption de plus en plus étendue de ces chaudières, à terre comme à bord. D'autres ne se font sentir que dans le service des navires; ils expliquent pourquoi les chaudières tubuleuses se répandent surtout dans la marine.

Nous considérerons successivement ces deux sortes d'avantages, en commençant par les premiers; nous les apprécierons, d'ailleurs, les uns et les autres, au point de vue des applications maritimes, les seules dont nous ayons à nous occuper.

146. — *Aptitude à résister aux hautes pressions.* — Les chaudières tubuleuses sont particulièrement aptes à supporter de très hautes pressions, parce que la plupart d'entre elles, particulièrement tous les modèles à circulation limitée et à circulation accélérée, se composent exclusivement de récipients cylindriques, que tous les cylindres sont de petit diamètre, enfin que la pression s'y exerce partout à l'intérieur des cylindres.

Avec les chaudières cylindriques tubulaires, on rencontre une limite de pression très strictement limitée, pour les enveloppes, par l'épaisseur des tôles que fournissent les usines métallurgiques, et, pour les foyers, par des difficultés de principe non surmontées, peut-être même insurmontables. Avec les chaudières tubuleuses, au contraire, la limite des pressions n'est plus imposée que par les conditions de fonctionne-

ment de la machine; c'est uniquement une limite de température, qui peut reculer à la suite d'un progrès dans les procédés de graissage.

Les chaudières tubuleuses se construisent couramment pour une pression de timbre de 21 kilogrammes; un détendeur limite alors la pression à la machine, aux environs de 18 kilogrammes. Ce n'est évidemment pas là le dernier mot.

147. — *Immunité relative contre les accidents.* — Cette immunité relative dépend, en partie, de l'aptitude à supporter des pressions très supérieures à celles pour lesquelles la chaudière est timbrée, en partie, du moindre volume d'eau et de vapeur contenu.

Pour le voisinage non immédiat de l'appareil, les chaudières tubuleuses donnent une sécurité incontestable et complète; leurs explosions ne produisent pas d'effets désastreux s'étendant à longue distance; à terre, par exemple, elles sont sans danger pour les maisons et les établissements limitrophes de l'usine qu'elles desservent.

A bord, et pour le personnel de chauffe, on ne peut plus parler d'immunité, depuis les catastrophes du *Sarrazin* et du *Jauréguiberry*, causées par des chaudières tubuleuses. Toutefois les bons modèles gardent un avantage incontestable; les chaudières Belleville, par exemple, qui ont eu de petits accidents et ont distribué bon nombre de brûlures, n'ont à ma connaissance tué personne; les chaudières Du Temple et Thornycroft ont eu quelquefois leurs faisceaux de tubes entièrement brûlés, sur les torpilleurs, sans qu'il en résultât, pour les chauffeurs, de conséquences comparables à celles des accidents produits par le manque d'eau, sur les chaudières locomotives.

En résumé, moyennant un choix judicieux des modèles et les soins nécessaires dans la conduite, on peut attendre, de l'adoption des chaudières tubuleuses, un grand accroissement de sécurité.

Parmi les qualités préventives contre les accidents, il faut compter la parfaite endurance de la plupart des chaudières tubuleuses pour les brusques changements de température, dont nous parlerons au numéro 145.

§ 2. — Avantages particuliers au point de vue de la marine.

148. — *Légèreté des chaudières tubuleuses. Discussion des chiffres qui la représentent.* — L'avantage principal des chaudières tubuleuses, pour la marine, et le motif dominant, qui justifie la hardiesse des premiers essais, est leur grande légèreté comparativement aux chaudières marines cylindriques.

Les tableaux détaillés de poids, donnés aux numéros 95 et 160, permettent de se rendre compte, dans le plus grand détail, des différences de poids entre les divers modèles de chaudières, ainsi que des éléments sur lesquels ces différences portent principalement. Pour la comparaison générales des types, nous allons nous servir, non pas de ces tableaux, mais bien de moyennes établies pour un nombre d'appareils beaucoup plus grand, en consultant les atlas de machines et de chaudières.

Les poids inscrits sur les atlas diffèrent un peu de ceux des tableaux des numéros 95 et 160, parce que ces derniers ont été établis dans les arsenaux même, d'après des relevés d'exécution, des calculs directs, et toutes les ressources d'information permettant de distinguer tous les éléments les uns des autres.

La quantité d'eau contenue, qui varie beaucoup d'une chaudière à l'autre, donne, à elle seule, plus du tiers de l'énomonie de poids réalisée. Les chaudières cylindriques type Amirauté contiennent 3.250 litres par mètre carré de grilles, et celles à retour de flamme 2.250 litres, soit en moyenne 2.750 litres. Avec les chaudières locomotives, on est descendu à 1.500 litres; les nombres variant de 1.300 à 1.700. Avec les chaudières tubuleuses, on trouve 270 litres seulement pour le modèle Belleville, 630 litres pour le modèle Niclausse, 820 litres pour le modèle D'Allest. Les chaudières à circulation accélérée ont commencé avec le poids d'eau des chaudières Belleville; mais, par des accroissements successifs, elles sont arrivées à celui des chaudières D'Allest. En somme, l'allègement réalisé sur l'eau est de plus de 2 tonneaux par mètre carré de grilles.

Si nous considérons maintenant le poids total par mètre carré de grilles, nous trouvons les résultats suivants:

Chaudières cylindriques type Amirauté.	12^{t},300
Chaudières cylindriques marines à simple façade. . . .	9^{t},300
— à double façade. . . .	8^{t},900
Chaudières locomotives pour navires	10^{t},500
— pour torpilleurs	6^{t},000
Chaudière Belleville	5^{t},800
— D'Allest.	5^{t},900
— Niclausse	5^{t},100
Chaudière Du Temple ancienne.	3^{t},600
— actuelle	4^{t},500
Chaudière Normand actuelle.	4^{t},600
Chaudière Thornycroft, déjà ancienne	3^{t},200
— chaudière du *Speedy*	4^{t},950

Ainsi le poids par mètre carré de grilles, des chaudières tubuleuses nouvelles, considérées comme propres à faire le service sur les grands navires, est très sensiblement la moitié du poids des chaudières cylindriques à retour de flamme du modèle le plus usité. Le poids des chaudières tubuleuses les plus légères est à peu près le tiers de celui des chaudières cylindriques type Amirauté, c'est-à-dire égal seulement au poids de l'eau contenue dans ces dernières

Les chaudières à circulation accélérée, construites pour les grands navires, ne seront vraisemblablement pas plus légères que les chaudières Belleville et Niclausse.

Dans le tableau qui précède, nous n'avons fait entrer que des poids d'appareils de navires de guerre. Sur les paquebots, d'après les chiffres donnés pour deux transatlantiques, dans le tableau du numéro 95, le poids s'élève à $13^{tx},9$. L'adoption des chaudières Belleville par les Messageries maritimes a donc réduit le poids de l'appareil évaporatoire dans le rapport 0,4.

Le poids par mètre carré de grilles représenterait la légèreté relative des diverses chaudières, si la puissance vaporisatrice par mètre carré de grilles était la même pour toutes. Il est très loin d'en être ainsi, surtout dans la Marine de guerre, où l'on fait un usage presque général du tirage forcé. La légèreté relative des appareils ne peut donc être établie que par une discussion très délicate, et forcément imparfaite, parce que l'on ne connaît vraisemblablement pas, pour chaque modèle de chaudières, la puissance maximum dont il est susceptible.

Le poids des chaudières par cheval, qui est le véritable coefficient de légèreté, est égal au quotient du poids par mètre carré de grilles divisé par le nombre de chevaux maximum pouvant être developpé par mètre carré de grilles ; le poids de vapeur par cheval, consommé par les machines, est toujours supposé constant.

La discussion des poids suppose donc la connaissance préalable de l'aptitude de chaque modèle à supporter des tirages forcés plus ou moins intenses.

149. — *Aptitude à supporter le tirage forcé.* — A ce point de vue, les chaudières tubuleuses se divisent en deux groupes très distincts.

1° Modèles à circulation limitée et à circulation libre, construits spécialement pour la marche régulière à un tirage modéré

Le dégagement de la vapeur est relativement lent; le parcours de la flamme dans les tubes est court; le volume de la chambre de combustion est en général faible.

Les plus grandes puissances développées jusqu'ici à bord ont été de

130 à 140 chevaux par mètre carré de grilles pour les chaudières Belleville et les chaudières Niclausse. On a été jusqu'à 175 chevaux sur le *Cassini*, pour les chaudières D'Allest; ces dernières chaudières présentent l'avantage d'une chambre de combustion plus grande, compensé d'ailleurs par l'inconvénient d'une fatigue plus forte de leur faisceau tubulaire aux allures forcées. Les chaudières Oriolle ont été poussées jusqu'à 250 chevaux sur les torpilleurs, mais au prix d'une production excessive de fumée.

Toutes ces chaudières paraissent faites, dans leur état actuel, pour les productions de 150 chevaux par mètre carré de grilles.

2° Chaudières à circulation accélérée, construites spécialement pour les torpilleurs, et appliquées ensuite à d'autres navires.

Le dégagement de la vapeur est rapide; le parcours de la flamme est généralement long; le fourneau présente une grande hauteur, et il est suivi quelquefois d'une petite boîte à feu latérale pour le retour des flammes.

Les derniers modèles Du Temple et Normand ont donné, sans inconvénient, jusqu'à 400 et 450 chevaux par mètre carré de grilles.

Si nous nous reportons aux chaudières cylindriques, qui peuvent fournir environ 200 chevaux par mètre carré de grilles, et aux chaudières locomotives qui en fournissent 350, nous trouvons, en résumé, que les chaudières tubuleuses du premier groupe sont inférieures, au point de vue de la combustion maximum, aux chaudières tubulaires, et que celles du deuxième groupe leur sont supérieures.

Toutes les chaudières tubuleuses des deux groupes, sans exception, ont d'ailleurs, aux intensités de tirage qui leur sont attribuées ci-dessus, l'avantage de moins fatiguer leurs organes principaux que les chaudières cylindriques. Les joints des tubes y sont mieux rafraîchis, et surtout beaucoup moins soumis à l'action de la chaleur; il n'y a pas de foyers exposés à s'écraser par suite d'une déformation.

Si nous combinons les nombres de 150 et 400 chevaux adoptés pour la puissance des chaudières tubuleuses par mètre carré de grilles, avec les poids contenus dans le tableau de la page 333, nous trouvons que le rapport du poids par cheval, des chaudières Belleville, D'Allest, Niclausse, à celui des chaudières cylindriques donnant 200 chevaux, s'élève à la valeur deux tiers. Pour les chaudières Du Temple ou Normand, ce même rapport descend au contraire à un quart. Il est vraisemblable que, pour ces dernières, les difficultés pratiques de la chauffe sur les grands navires ne permettront guère de donner beaucoup plus de 200 chevaux par mètre carré de grilles; le coefficient d'économie de poids, par rapport aux chaudières cylindriques, restera ainsi compris entre un demi

et deux cinquièmes ; mais l'abaissement du tirage au-dessous de ce que la chaudière peut supporter constituera un coefficient de sécurité.

150. — *Rapidité de mise en pression.* — La mise en pression des chaudières tubuleuses ne demande pas plus d'une heure, tandis que celle des chaudières cylindriques exige habituellement quatre heures. C'est là un avantage pour la Marine de guerre ; mais il ne faudrait pas s'en exagérer l'importance ; l'opération réellement lente est le réchauffage de la machine, auquel on ne consacre pas moins de dix à douze heures sur les paquebots, pour éviter tout danger d'avaries.

Pour les simples embarcations, la rapidité de mise en pression des chaudières est une qualité vraiment précieuse.

§ 3. — Considérations diverses.

151. — *Encombrement horizontal.* — L'encombrement horizontal d'une chaudière s'exprime par le rapport entre la surface de sa projection horizontale et sa surface de grilles, ou, en d'autres termes, par l'encombrement horizontal du mètre carré de grilles. La distinction des chaudières tubuleuses en deux groupes, au point de vue du tirage forcé, se retrouve la même au point de vue de l'encombrement.

Les chaudières Belleville, D'Allest, Niclausse prennent peu de place en projection horizontale. Le coefficient d'encombrement descend à 1,5 pour la chaudière Niclausse, la plus favorisée de toutes ; il est de 1,7 à 1,8 pour la chaudière D'Allest ; il a une valeur intermédiaire, 1,6 à 1,7 pour la chaudière Belleville.

Les chaudières Du Temple et surtout Normand sont encombrantes. Le coefficient est en moyenne 2,5 pour les modèles Du Temple et Guyot ; il s'élève à 3 pour le modèle Normand.

Si nous nous reportons aux chaudières cylindriques, en laissant de côté les modèles à tubes en prolongement, d'un encombrement tout à fait excessif, nous trouvons le coefficient d'encombrement égal en moyenne à 1,75 pour les chaudières à double façade et à 2 pour celles à simple façade. Les chaudières tubuleuses du premier groupe ont donc la supériorité, et celles du second groupe l'infériorité, à surface égale de grilles, par rapport aux chaudières cylindriques à retour de flamme.

Si maintenant nous tenons compte des puissances par mètre carré de grilles attribuées plus haut à chaque modèle pour les grands navires, nous trouvons que les chaudières tubuleuses du premier groupe ont à peu près le même encombrement que les chaudières cylindriques et celles du second groupe un encombrement notablement plus fort.

En résumé sous le rapport de l'encombrement à bord des navires, les chaudières tubuleuses se présentent plutôt en état de désavantage par rapport aux anciennes chaudières.

152. — *Prix des chaudières tubuleuses. Leur durée.* — La classification suivie dans les numéros précédents se justifie au point de vue du prix, aussi bien qu'à celui du fonctionnement; mais on ne trouve des données un peu certaines que pour les chaudières du premier groupe, les seules dont il a été fait une application étendue aux grands navires.

Le prix par mètre carré de grilles des chaudières Belleville achetées par la Marine dans ces dernières années a oscillé entre 7.300 fr. et 9.600 fr.; il a été, en moyenne, de 8.600 fr. Les chaudières Niclausse du *Friant* ont également été payées 8.600 fr. Pour les chaudières D'Allest, le prix est un peu plus élevé ; il a oscillé entre 7.300 fr. et 10.400 fr., et a été, en moyenne, de 9.000 fr. La différence est insignifiante, et ne saurait influer sur le choix à faire entre ces trois modèles.

Si nous prenons, à titre de comparaison, le prix des chaudières cylindriques, nous trouvons, comme prix moyens à mettre en regard des précédents, 8.800 fr. pour les chaudières à retour de flamme, à simple ou à double façade, 13.000 fr. pour les chaudières à tubes en prolongement, 14.200 fr. pour les chaudières locomotives. La comparaison, dans ces termes, est favorable aux chaudières tubuleuses considérées. En tenant compte du travail par mètre carré de grilles, ces chaudières tubuleuses deviennent plus chères d'un quart que les chaudières à retour de flamme ; mais elles restent moins chères d'un dixième, que les chaudières type Amirauté, qui avaient supplanté les chaudières à retour de flamme dans ces dernières années.

Nous n'avons qu'un seul exemple de chaudieres tubuleuses du deuxième groupe achetées pour des navires véritables; il se rapporte aux chaudières Normand du *Dunois* et du *Lahire*, payées 17.400 fr. par mètre carré de grilles. Ce prix est probablement trop élevé pour servir de terme de comparaison ; il n'a d'analogue, dans les séries des autres appareils, que le prix des chaudières cylindriques du *Fleurus*, payées 17.600 fr. Les chaudières Guyot de la *Jeanne-d'Arc* ne coûteront que 12.000 fr., d'après le devis estimatif, en prenant les évaluations les plus larges; ce prix est encore élevé, mais il tombe au-dessous de celui des chaudières type Amirauté ; de plus, quand nous supposons qu'on doit demander le même travail par mètre carré de grilles aux chaudières Normand ou Guyot et aux chaudières de l'Amirauté, nous défavorisons évidemment les premières.

En somme, la considération de prix est plutôt favorable aux chau-

dières tubuleuses ; elle constituerait même, pour les modèles Belleville et Niclausse, un des avantages généraux qui plaident en faveur de leur adoption générale, à terre comme à bord, s'il n'y avait, à côté du prix, à considérer la durée, sur laquelle on manque de données certaines.

Les chaudières Belleville sont le seul modèle de chaudières tubuleuses dont la Marine ait fait un emploi prolongé. Malheureusement, la facilité avec laquelle les tubes et les serpentins se remplacent isolément ne permet pas de fixer le moment où la presque totalité a été changée ; le remplacement des cendriers et des enveloppes, qui peut seul faire époque, est une opération sans importance. Il est arrivé à des chaudières Belleville, par exemple sur le *Milan* en 1891, d'avoir assez de tubes percés, dans une campagne de quelques mois, pour rentrer hors de service, après être parties, remises en bon état. Sur le *Voltigeur*, au contraire, les chaudières Belleville, renouvelées par parties depuis bientôt vingt ans, ont toujours bien résisté, et ont subi victorieusement l'épreuve de plusieurs longues campagnes. La question de durée est, comme on voit, très difficile à éclaircir.

A défaut de faits précis, on doit considérer que les chaudières cylindriques ont maintenant des tubes en fer semblables à ceux des chaudières tubuleuses, et qu'elles ne peuvent pas souvent recevoir à bord, surtout dans la Marine militaire, des soins de conservation plus parfaits que ceux dont les chaudières tubuleuses sont susceptibles. On peut de plus, se rapporter à certains exemples, comme celui des chaudières du *Marceau* dans la campagne de Cronstadt, aussi défavorables que l'exemple du *Milan* cité plus haut. On arrive alors à cette conclusion, que les chaudières cylindriques n'offrent pas des garanties de bon fonctionnement prolongé très supérieures à celles des chaudières Belleville.

Du reste, il n'y aura jamais de comparaison exacte possible entre deux durées, dont une seule peut se définir. La chaudière cylindrique du navire de guerre dure huit ans, dix au plus, avec une refonte dans l'intervalle ; après ce temps elle est condamnée et démolie, bien qu'elle puisse contenir beaucoup de bons morceaux, parce qu'il y a forcément des limites aux rapiéçages. Au bout de dix ans, une chaudière tubuleuse n'a pas subi de refonte mais elle a reçu beaucoup de réparations ; certaines parties peuvent avoir été changées deux fois déjà et avoir besoin d'être remplacées une troisième, sans que cela ôte rien de leur valeur aux parties qui sont toujours restées intactes ; il n'y a donc aucun motif de prononcer la condamnation de l'appareil.

Les considérations qui précèdent paraissent favorables aux chau-

dières tubuleuses au point de vue de la durée ; mais il serait imprudent de les généraliser. Les chaudières tubulaires, dans certaines conditions d'entretien et de service, sont susceptibles de fournir sans refonte une carrière très prolongée. Nous avons cité, au n° 94, celles de la compagnie *White-Star*, qui marchent depuis vingt ans, et, en France, celles du *Notre-Dame-du-Salut*, qui comptaient vingt ans de service, sans refonte, au moment où la Marine a affrété ce paquebot. Une chaudière tubuleuse ne peut, sans doute, parvenir à cet âge avancé sans avoir subi à mainte reprise l'opération du couteau de Jeannot. Aussi, dans les compagnies de navigation, les directeurs économes, quand ils sont sûrs de leur personnel, restent-ils, en général, fidèles aux anciens modèles qui leur offrent de sûres garanties.

Inversement, quand les conditions de conservation sont tout à fait défectueuses, comme sur les torpilleurs, où les chaudières locomotives duraient trois ans, les chaudières tubuleuses peuvent prendre un avantage décidé ; M. Thornycroft affirme que quelques-unes de ses chaudières comptent déjà huit ans de service sans grosse réparation, bien certainement sans refonte proprement dite.

153.— *Facilité des réparations. Difficulté du tamponnage des tubes.* — Les chaudières tubuleuses se composent d'éléments juxtaposés et généralement amovibles, de telle sorte que leur réparation, en cas d'avaries, se borne au démontage d'une pièce et à son remplacement par une pièce de rechange. Ce travail peut toujours se faire à bord, même quand l'équipage ne comprend pas d'ouvriers véritables.

Le remplacement des tubes est, sur quelques chaudières, d'une facilité et d'une rapidité extraordinaires ; ainsi sur la chaudière Niclausse, le remplacement d'un tube ne demande pas plus de deux minutes, une fois la chaudière vidée ; sur la chaudière Belleville, on peut, en deux heures, enlever un serpentin complet et le remplacer par un autre. Sur les chaudières Du Temple et leurs dérivées, l'opération se complique, par suite de la nécessité de démonter plusieurs tubes avant d'arriver à celui qu'il faut extraire du faisceau ; mais chaque tube se retire sans peine de son encastrement ; c'est l'affaire d'un dévissage, ou de quelques coups de marteau sur une chasse à gorge. Sur les chaudières D'Allest, seules, l'enlèvement des tubes présente plus de difficultés que sur les chaudières cylindriques.

Les réparations, même quand elles demandent un chômage de quelques jours, au lieu d'une extinction des feux de quelques heures, sont donc un jeu, comparativement à la réparation d'une avarie produite par un coup de feu dans les foyers ou les boites à feu d'une chaudière cylindrique.

En regard de cette facilité très précieuse de réparation, sur les navires en cours de campagne, il faut porter au passif des chaudières tubuleuses, l'impossibilité, inhérente à leur principe même, du tamponnage en marche, au cas de fuite dans un tube. La vidange de l'eau, jusqu'au-dessous du niveau de l'orifice inférieur du tube, et parfois la vidange complète, sont en effet indispensables.

Au sujet du tamponnage des tubes, après les feux éteints et la vidange faite, les divers modèles de chaudières tubuleuses se présentent dans des conditions très variées, qui dépendent de leur système de construction.

Sur les chaudières Belleville et en général sur toutes les chaudières dépourvues de collecteurs, aucun tamponnage n'est possible. On procède toujours au remplacement de la pièce avariée.

Sur les chaudières D'Allest et toutes celles à tubes droits avec regards en face des tubes, le tamponnage peut se faire exactement comme sur

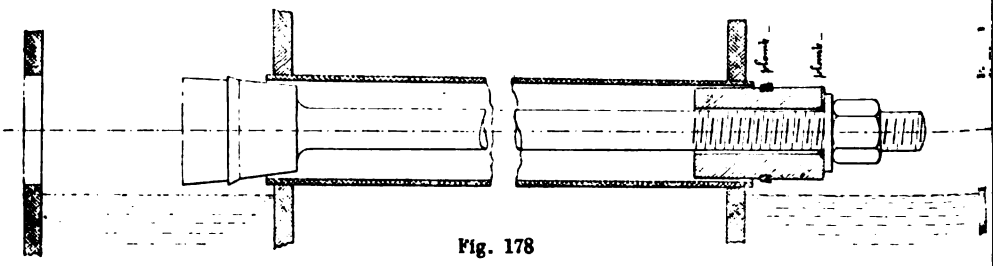


Fig. 178

les chaudières cylindriques, et à l'aide des mêmes tampons doubles. La figure 178 représente un tampon, destiné spécialement aux chaudières D'Allest, qui est dû à M. Girard Mécanicien-inspecteur de la marine.

Tube avec écrou borgne

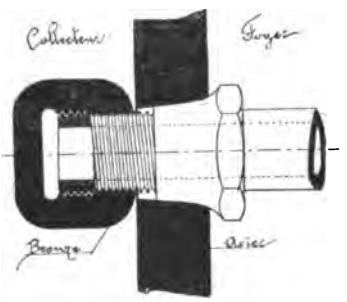


Fig. 179

Bouchon conique remplaçant un tube

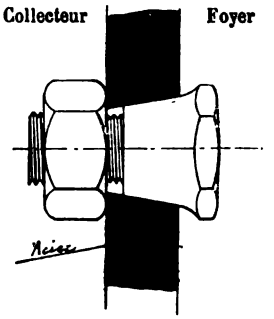


Fig. 180

Sur les chaudières Niclausse, il n'est pas question de tamponner, parce que la mise en place du tampon serait exactement la même opération que le changement du tube.

Sur les chaudières Du Temple, le tamponnage est très facile, grâce à la disposition des joints à écrous, lorsque le filetage est en bon état dans le collecteur. Il suffit d'enlever l'écrou de serrage et de le remplacer par un écrou borgne. Les écrous borgnes adoptés pour cet usage (fig. 179), sont ceux de M. le mécanicien Portay. En raison du temps nécessaire pour refroidir la chaudière, l'opération demande en tout quatre heures, à compter du moment où l'on met bas les feux, jusqu'au moment où l'on recommence à faire le plein.

Quand le filetage est en mauvais état, et qu'il faut couper le tube pour passer un véritable tampon (fig. 180),l'opération exige une bonne heure de plus. Sur les nouvelles chaudières à joints en acier, l'obligation de couper le tube se rencontrera beaucoup plus fréquemment qu'avec les anciens joints en laiton.

Sur les chaudières Normand, et en général toutes celles dont le joint des tubes est fait par mandrinage, le modèle de tampon de la figure 180 peut évidemment s'appliquer; mais on préfère en général chasser, de l'intérieur du collecteur, dans l'extrémité du tube, un simple bouchon conique, quelquefois fileté, que la pression intérieure contribue ensuite à tenir bien appliqué.

L'impossibilité de tamponner en marche rend précaire la situation, par mauvais temps, des petits bâtiments munis d'une chaudière unique.

154. — *Résistance aux brusques changements de température.* — La plupart des chaudières tubuleuses, c'est-à-dire la chaudière Niclausse parmi celles à circulation libre, et toutes les chaudières à circulation limitée et à circulation accélérée, jouissent de la propriété de supporter sans avaries les plus brusques variations de température, par exemple une mise bas subite des feux, en plein fonctionnement, avec ouverture simultanée de toutes les portes. M. Niclausse se fait un jeu de soumettre à cette rude épreuve sa chaudière d'atelier, pour la plus grande édification des visiteurs. L'expérience analogue de M. Yarrow, décrite au numéro 138, et le mode de ramonage employé par les chauffeurs de M. Normand, décrit au numéro 48, ne sont pas moins typiques.

On sait au contraire, ou plutôt on ne sait pas assez, combien les chaudières tubulaires sont délicates sous le rapport des effets d'un changement subit de température, même bien moins brusque que ceux dont nous venons de parler. Un ralentissement de production de vapeur en pleine marche, obtenu en ouvrant les fourneaux et les boites à fumée, suffit pour soumettre toutes les tôles des boites à feu et à fumée, à des charges supérieures à la limite d'élasticité ; de là, fuite des tubes et gondolement des plaques de tête ; de là surtout altération du matage des

coutures, préparant des fuites prochaines, et même fendillement des tôles dans les joints, source de graves avaries ultérieures. La conduite des feux dans les chaudières tubulaires, doit toujours être très régulière et très uniforme.

Si les entraînements d'eau n'étaient pas à craindre, en cas de variations brusques de l'allure du moteur, les chaudières tubuleuses rendraient inoffensives toutes les manœuves subites demandées à la machine. Mais comme ces entraînements peuvent toujours se produire et qu'ils amènent dans les chaudières tubuleuses des abaissements de niveau très dangereux, les variations d'allures brusques de la machine doivent rester interdites, en dehors des cas d'absolue nécessité.

§ 4. — Inconvénients des chaudières tubuleuses.

155. — *Danger des irrégularités d'alimentation.* — Après les avantages indiscutables des chaudières tubuleuses, soit généraux, soit particuliers à la marine, et leurs qualités en partie compensées par des défauts et donnant lieu à discussion, il reste à considérer leurs inconvénients. A ce point de vue, on rencontre uniquement des difficultés de couduite.

En raison du très faible volume d'eau qu'elles contiennent, les chaudières tubuleuses exigent des soins minutieux dans l'alimentation. Une chaudière de 5 mètres carrés de surface de grilles marchant au tirage forcé peut vaporiser 12 tonnes d'eau à l'heure. Si le réservoir contient une tonne d'eau seulement, au niveau normal, une interruption dans l'alimentation videra le réservoir en cinq minutes ; l'abaissement du niveau dans les tubes sera ensuite extrêmement rapide. Le collecteur supérieur est généralement placé en dehors des courants de flammes, mais les tubes sont soumis à des échauffements capables, en cas de marche au tirage forcé, de produire la fusion de l'acier. Le surveillance des niveaux et la conduite de l'alimentation exigent donc des soins minutieux. Sur les grands bâtiments, où l'appareil évaporatoire contient un grand nombre de chaudières, dont plusieurs desservies par un tuyau commun, l'adoption de régulateurs automatiques d'alimentation parait indispensable.

156. — *Nécessité d'une eau d'alimentation très pure.* — Les tubes des chaudières tubuleuses ne résistent à la chaleur qu'à la condition d'être rafraîchis par une circulation d'eau continue ; tout tube obstrué est un tube brûlé ; tout tube, où un dépôt commence à se former, est un tube obstrué à brève échéance, parce que les dépôts s'accroissent d'eux-mêmes,

en ralentissant le mouvement de circulation. Les chaudières tubuleuses ont donc besoin d'une eau très pure ; la réparation à l'eau de mer doit être rigoureusement proscrite, et tous les appareils de purification doivent être entretenus en parfait état de fonctionnement.

En résumé, les inconvénients des chaudières tubuleuses se bornent à des dangers d'avaries, qui peuvent être évités ; mais la vigilance doit être incessante et minutieuse. Si le vingtième de l'eau douce se perd dans le double trajet d'aller de la vapeur aux cylindres, et de son retour aux chaudières après condensation, et que la réparation s'opère en ouvrant un robinet de la mer au condenseur, si surtout les chefs mécaniciens croient déroger, en surveillant eux-mêmes la chauffe, alors on est en présence d'un navire auquel les chaudières tubuleuses ne sauraient convenir.

Il faut du reste, que l'on se guérisse d'un préjugé funeste, au sujet des chaudières. Elles ne sont point l'appareil de construction facile et de conduite rudimentaire, que quelques-uns supposent. Il n'y a pas actuellement, dans le tracé et la construction des machines, de problème approchant en difficulté de ceux qui se rapportent aux chaudières ; il n'y a pas de poste dans la machine, pour lequel il faille autant de soin toujours, et parfois autant de sang-froid, d'intelligence et d'initiative, que pour la conduite des feux.

§ 5. — Comparaison des chaudières tubuleuses entre elles.

157. — *Comparaison entre les trois modèles Belleville, D'Allest, Niclausse.* — La comparaison entre les divers modèles de tout genre est implicitement contenue dans les numéros qui précèdent ; mais, sur quelques points, il est possible de préciser un peu davantage.

Les trois modèles Belleville, D'Allest, Niclausse sont actuellement en service sur trois croiseurs semblables, le *Bugeaud*, le *Chasseloup-Laubat*, le *Friant*. On peut espérer obtenir ainsi des données comparatives précises, au sujet de leur fonctionnement pratique. Les trois machines sont d'ailleurs à peu près identiques et sortent de la même usine ; les détentes, égales au quotient du volume du cylindre d'évacuation D^2 divisé par le volume d'admission $i\,d^2$, sont analogues.

Les données principales sont :

	BELLEVILLE — Bugeaud	D'ALLEST — Chasseloup-Laubat	NICLAUSSE — Friant
Surface de grilles	70^{mq},40	68^{mq},00	72^{mq},72
Surface de chauffe	2006,	1807,	2130
Charge des soupapes	17	15^{k}	15^{k},
Poids total des chaudières pleines (d'après les albums des appareils moteurs).	365^{t}	347^{t}	335^{t}
Poids total d'après exécution (nombres relevés dans les arsenaux). . .	414	367	369
Détente maximum dans la machine $\frac{D^2}{id^2}$	7,41	7,41	7,41

Les résultats des essais de recette des appareils ont été les suivants :

	BELLEVILLE — Bugeaud	D'ALLEST — Chasseloup-Laubat	NICLAUSSE — Friant
1° — ESSAI DE VITESSE			
Pression à la chaudière.	15^{k},75	13^{k},00	13^{k},68
Pression à la machine.	11 ,381	11 ,241	11 ,47
Détente $\frac{D^2}{id^2}$	7 ,200	7 ,34	7 ,63
Puissance développée.	9565 chevaux	9842 chevaux	9563 chevaux
Consommation de charbon par m^2 de grilles. .	127^{k},0	116^{k},6	122^{k},2
Consommation de charbon par cheval . . .	0 ,923	0 ,796	0 ,909
2° — ESSAI DE CONSOMMATION			
Pression à la chaudière.	13 ,690	12 ,060	12 ,655
Pression à la machine.	9 ,049	9 ,532	9 ,958
Détente $\frac{D^2}{id^2}$	12 ,600	12 ,59	12 ,40
Puissance développée	3781 chevaux	3582 chevaux	3655 chevaux
Consommation de charbon par m^2 de grilles .	46^{k},195	52^{k},98	50^{k},031
Consommation de charbon par cheval . . .	0 ,612	0 ,662	0 ,667

Le fonctionnement a été parfait pour les trois chaudières ; l'impression a été surtout favorable pour la chaudière Niclausse, qui était moins connue que les deux autres, et dont les excellents résultats étaient moins prévus.

En prenant pour unité, la consommation par heure et par cheval de la chaudière Belleville dans les deux essais, on forme le tableau suivant :

	BELLEVILLE	D'ALLEST	NICLAUSSE
Essai de vitesse.	1	0,858	0,905
Essai de consommation	1	1,088	1,089

Pour la consommation, la chaudière Belleville a donc l'avantage dans la marche à feux retenus; ses bonnes qualités à ce point de vue étaient depuis longtemps établies.

A feux poussés, la chaudière Belleville a une infériorité de rendement de près de deux dixièmes, par rapport à la chaudière D'Allest, et de près d'un dixième, par rapport à la chaudière Niclausse. Ces résultats sont également conformes à ce que l'on devait prévoir; mais ils ont été rendus plus saillants par cette circonstance, que les feux ont été poussés plus vivement, sur la chaudière la moins propre aux grandes combustions.

En raison de l'absence de circulation, la vapeur des chaudières Belleville doit se frayer son chemin dans de l'eau presqu'au repos; elle doit produire plus d'émulsion à la surface, et se dégager en entraînant plus d'eau. De plus, le phénomène de convection est plus imparfait. La chambre de combustion des chaudières Belleville se limite à un fourneau très bas. Tels sont les deux motifs probables de l'infériorité de la chaudière Belleville aux combustions vives; tous les deux sont évités sur la chaudière D'Allest; le premier est évité sur la chaudière Niclausse.

La chaudière D'Allest ne supporte pas les combustions vives, en raison même de la disposition générale qui contrarie la dilatation des tubes.

Il faudrait, pour avoir des conclusions plus nettes et plus complètes, faire travailler les trois chaudières, jusqu'à la limite de ce qu'elles peuvent produire, dans des expérienccs de vaporisation comprenant la mesure du poids d'eau d'alimentation et du titre de la vapeur obtenue; la machine ne fonctionnerait pas, puisqu'il ne serait pas possible de lui faire consommer toute la vapeur produite. On vérifierait ainsi les assertions des constructeurs qui, tous trois, et particulièrement M. Niclausse, attribuent à leurs chaudières, d'après leur expérience personnelle et des essais d'atelier, la faculté de bien fonctionner à des intensités de combustion supérieures à celles réalisées dans les expériences des trois croiseurs.

Depuis les essais de recette, la chaudière du *Friant* a eu une légère avarie dans un tube mal soudé.

L'expérience journalière confirme que la chaudière Belleville et la chaudière Niclausse se rapprochent l'une de l'autre, sous le rapport de la rusticité, de la résistance aux variations de température, de la commodité des démontages et des réparations; sous ce dernier rapport, la chaudière Niclausse est supérieure à toutes les autres. La chaudière D'Allest, dont la construction se rapproche davantage de celle des chaudières tubulaires, réalise moins bien, sous ces différents rapports, les avantages des chaudières tubuleuses.

158. — *Comparaison des chaudières Du Temple-Normand, avec les précédentes.* — Parmi les modèles à circulation accélérée, les chaudières Du Temple et les chaudières Normand sont les seules qui aient subi, dans la Marine, l'épreuve d'un service prolongé.

Ces chaudières n'ont jamais été l'objet d'un essai comparatif avec les trois modèles considérés dans le numéro qui précède; mais, de leur comparaison avec les chaudières locomotives, qu'elles ont remplacées sur les torpilleurs français, on peut conclure qu'elles ont une supériorité générale marquée sous le double rapport de la bonne combustion et de l'utilisation de la chaleur, tout au moins aux grandes combustions. L'état actuel des faits établis permet de leur demander une combustion de 200 kilogrammes avec plus de sécurité qu'une de 150 kilogammes aux chaudières à circulation limitée ou même libre. On a obtenu sur le *Forban* des résultats économiques remarquables, inscrits dans le tableau de la page 87.

Les chaudières Du Temple et Normand sont, d'autre part, en état d'infériorité, par rapport aux précédentes, et surtout par rapport à la chaudière Niclausse, sous le point de vue de l'ensemble des facilités de ramonage, de visite, de démontage, de réparation. On trouve donc des inconvénients, aussi bien que des avantages, à les appliquer aux grands bâtiments. D'autre part, leur adoption paraît s'imposer pour les torpilleurs, les contre-torpilleurs, les éclaireurs et toute la série des petits navires rapides. Dès lors, le grand intérêt de l'uniformisation des types devient un motif sérieux de généraliser leur emploi, dans toute la limite que la prudence permet.

159.— *Combinaison des chaudières tubuleuses et des chaudières cylindriques.* — Dans la Marine de guerre française, et à la compagnie des Messageries maritimes, le problème de la substitution complète des chaudières tubuleuses aux chaudières cylindriques a été hardiment abordé. Ailleurs, on a procédé avec une prudence très grande, en opérant d'abord un remplacement partiel, et en juxtaposant des chaudières

des deux systèmes dans une même chambre de chauffe. Telle a été la solution adoptée en Amérique, pour l'installation des chaudières Ward sur le *Monterey*; en Allemagne, pour l'installation des chaudières des cuirassés *Kaiser-Friedrich III* et *Ersatz-Friedrich-der-Grosse*, et du croiseur *Ersatz-Leipzig*, le choix devant être fait plus tard entre les quatre modèles, Belleville, Niclausse, Dürr, Tornycroft, en essai sur quatre croiseurs ; en Hollande, pour les croiseurs *Holland*, *Zieland*, *Friedland*, qui ont deux chaudières cylindriques et huit chaudières Yarrow; enfin, sur une frégate-école de la République Argentine, qui reçoit des chaudières Niclausse et des chaudières cylindriques.

On trouve également la chaudière Normand-Sigaudy, combinée avec la chaudière cylindrique sur un remorqueur de Bayonne.

Cette adoption partielle des appareils nouveaux ne paraît avoir présenté aucun inconvénient. Les chaudières des deux systèmes, desservies par un tuyautage commun, s'accordent bien ensemble. Il est vraisemblable que c'est sous cette forme, et moyennant ces précautions, que les chaudières tubuleuses pourront s'introduire dans la marine de commerce, surtout quand on y voudra recourir à des modèles moins bien éprouvés par une longue pratique que la chaudière Belleville.

CHAPITRE XV

POIDS & ENCOMBREMENT DES CHAUDIÈRES TUBULEUSES

160. — *Tableaux de poids.* — Pour le calcul des poids des chaudières tubuleuses, la division et le groupement des éléments ont été faits de la même manière que pour les chaudières cylindriques, afin de rendre possibles les comparaisons de détail.

Comme la charge des matériaux est très faible, dans la plupart des parties de la construction, et surtout dans les tubes qui constituent l'élément principal des chaudières tubuleuses, la considération de la pression n'intervient guère pour la détermination des épaisseurs; la question de durée a plus d'importance. Le classement suivi, très logique pour les chaudières cylindriques, se trouve donc un peu artificiel pour les chaudières tubuleuses. En particulier, on remarquera que le rapport des poids P_1 à la pression intérieure Π est sans intérêt; mais comme d'ailleurs la pression Π est à peu près la même pour tous les modèles, il n'y a pas à craindre que la considération de ce rapport conduise à des comparaisons inexactes entre diverses chaudières.

Des tableaux aussi détaillés n'ont pu être dressés qu'en empruntant à des sources diverses, et souvent, en mettant à contribution l'obligeance des constructeurs. Beaucoup de chiffres, pris sur des relevés d'après exécution, sont plus exacts que ceux portés dans les atlas des machines; mais quelques autres ne sauraient offrir les mêmes garanties.

CHAUDIÈRES BELLEVILLE

			Alger	Latouche-Tréville	Bugeaud	Bouvet
Indications générales	Timbre des chaudières	II	17k	17k,00	17k,00	17k,00
	Surface de grilles totale	G	70m²,08	64m²,50	70m²,40	104m²,80
	Surface de chauffe totale	S	2068m²	1814m²	2006m²	2989m²
	Puissance en chevaux réalisée aux essais,	F	8310chx	8276chx	9565chx	14000chx (*)
	Quantité de charbon brûlé par mètre carré de grilles	K	91k	105k,12	127k,	133k,58 (*)
	Quantité de charbon brûlé par cheval et par heure aux essais	C	0k,767	0k,808	0k,923	1k,00 (*)
I Éléments qui dépendent de la pression de timbre II, et dont le poids par m² de grilles doit être rapporté à cette pression II.	Chaudières principales, sans les barreaux de grille ni la maçonnerie		127656k.	108112k.	111688k.	157105k.
	Soupapes d'arrêt, de sûreté, de décharge, détendeurs, épurateurs, surchauffeurs		45495	33634	46572	52056
	Tuyautage et robinetterie des chaufferies		22194	13386	20000	34500
	Total des poids I	P_1	195345k.	155132k.	178260k.	243661k.
	Rapport	$\frac{P_1}{G}$	2787k	2405k	2532k	2325k
	Rapport	$\frac{P_1}{GII}$	163 ,9	141 ,5	148 ,9	136 ,7
II Éléments qui dépendent de l'intensité de la chauffe, c'est-à-dire de la quantité de charbon K brûlé par m² de grilles ou de la quantité d'eau vaporisée par m² de grilles; le total de ces poids, par m² de grilles, doit être rapporté à la combustion K.	Pompes alimentaires		8818k.	9100k.	11868k.	13376k.
	Bâches des pompes alimentaires et caisses de réserve		6040	4310	5710k,	5500
	Réchauffeurs d'eau d'alimentation		»	»	»	»
	Filtres à éponges, appareils de purification de l'eau, caisses à eau de chaux		1300	3200	3934	7600
	Bouilleurs pour réparation des pertes		2200	5800	2917	7500
	Eau des bâches, des caisses d'alimentation et des appareils précédents		22000	17000	20050	29000
	Ventilateurs ou machines soufflantes pour le tirage forcé		2411	6888	11500	18300
	Appareils de réchauffage d'air		»	»	»	»
	Total des poids II	P	42769k.	46298k.	55979k.	81276k.
	Rapport	$\frac{P_2}{G}$	610k	718k	795k	775k
	Rapport	$\frac{P_2}{GK}$	6 ,71	6 ,91	6 ,26	5 ,80
III Éléments indépendants à la fois de II et de K, qui doivent être simplement rapportés à la surface de grilles G.	Eau des chaudières		20600k.	18160k.	16200k	29600k.
	Grilles, maçonnerie et autels		55110	45150	48966	73944
	Cheminées, conduits de fumée, boîtes à fumée		22810	19500	27840	43500
	Feutrage et enveloppes isolantes quelconques		86982	58640	67123	87143
	Outillage et rechanges		6745	6200	6869	11000
	Parquets et échelles des chaufferies		14115	9000	12687	19500
	Total des poids III	P_3	206362k.	151650k.	179685k.	264687k.
	Rapport	$\frac{P_3}{G}$	2945k	2351k	2552k	2526k
Résumé	Poids total	$P_1+P_2+P_3$	444476k.	353080k.	413924k.	589624k.
	Poids total par m² de grilles	$A=\frac{P_1+P_2+P_3}{G}$	6342k	5474k	5879k	5626k
	Puissance en chevaux réalisée aux essais par m² de grilles	$B=\frac{F}{G}$	118chx,6	128chx,3	135chx,9	133chx,6
	Poids total par cheval	$D=\frac{P_1+P_2+P_3}{F}=\frac{AC}{K}$	53k,48	40k,3	43k,2	42k,1

(*) D'après les prévisions.

CHAUDIÈRES ORIOLLE

			Zouave	Torpilleurs 161-162-163
Indications générales		Timbre des chaudières ..... H	14^{k}	14^{k}
		Surface de grilles totale ..... G	5^{m2},84	4^{m2},50
		Surface de chauffe totale .. .. S	204^{m2}	158^{m2},40
		Puissance en chevaux réalisée aux essais F	1013^{chx}	1116^{chx}
		Quantité de charbon brûlé par mètre carré de grilles ..... K	181^{k}	270^{k}
		Quantité de charbon brûlé par cheval et par heure aux essais C	1^{k},043	1^{k},147
I	Eléments qui dépendent de la pression de timbre H, et dont le poids par m^{2} de grilles doit être rapporté à cette pression H.	Chaudières principales, sans les barreaux de grille ni la maçonnerie	8000^{k}	7732^{k}
		Soupapes d'arrêt, de sûreté, de décharge, détendeurs, épurateurs, surchauffeurs....	3500	636
		Tuyautage et robinetterie des chaufferies..	1000	487
		Total des poids I..... ..... P_1	12500^{k}	8855^{k}
		Rapport ..... $\frac{P_1}{G}$	2140	1968
		Rapport..... $\frac{P_1}{GH}$	152^{k},88	140 ,55
II	Eléments qui dépendent de l'intensité de la chauffe, c'est-à dire de la quantité de charbon K brûlé par m^{2} de grilles ou de la quantité d'eau vaporisée par m^{2} de grilles; le total de ces poids, par m^{2} de grilles, doit être rapporté à la combustion K.	Pompes alimentaires	670^{k}	1544^{k}
		Bâches des pompes alimentaires et caisses de réserve..	300	131
		Réchauffeurs d'eau d'alimentation.....	»	540
		Filtres à éponges, appareils de purification de l'eau, caisses à eau de chaux	150	98
		Bouilleurs pour réparation des pertes.....	»	78
		Eau des bâches, des caisses d'alimentation et des appareils précédents.....	800	800
		Ventilateurs ou machines soufflantes pour le tirage forcé	221	299
		Appareils de réchauffage d'air.....	»	»
		Total des poids II ... . P_2	2141^{k}	3490^{k}
		Rapport ..... $\frac{P_2}{G}$	366 ,60	775 ,55
		Rapport.... .... $\frac{P_2}{GK}$	2 ,02	2 ,87
III	Eléments indépendants à la fois de H et de K, qui doivent être simplement rapportés à la surface de grilles G.	Eau des chaudières.....	2800^{k}	2200^{k}
		Grilles, maçonnerie et autels	2300	1415
		Cheminées, conduits de fumée, boîtes à fumée	700	311
		Feutrage et enveloppes isolantes quelconques	355	130
		Outillage et rechanges	1500	177
		Parquets et échelles des chaufferies	540	183
		Total des poids III..... P_3	8195^{k}	4416^{k}
		Rapport..... ..... $\frac{P_3}{G}$	1403 ,25	981 ,33
Résumé.		Poids total..... $P_1 + P_2 + P_3$	22836^{k}	16761^{k}
		Poids total par m^{2} de grilles $A = \frac{P_1+P_2+P_3}{G}$	3910^{k}	3725
		Puissance en chevaux réalisée aux essais par m^{2} de grilles ..... $B = \frac{F}{G}$	173^{chx},46	248^{chx}
		Poids total par cheval $D = \frac{P_1+P_2+P_3}{F} = \frac{AC}{K}$	22^{k},53	15^{k},02

CHAUDIÈRES D'ALLEST

			Jemmapes	Chasseloup-Laubat	Cassini	Carnot	Du Chayla
Indications générales	Timbre des chaudières	II	15k,00	15k,00	15k,00	15k,00	15k,00
	Surface de grilles totale	G	60m2,00	68m2,00	31m2,95	100m2	68m2,00
	Surface de chauffe totale	S	2011m2,00	1807m2,6	991m2,00	3456m2	2186m2
	Puissance en chevaux réalisée aux essais.	F	9227chx	9962chx.	5594chx.	15000chx(*)	9500chx*
	Quantité de charbon brûlé par mètre carré de grilles	K	147k.	116k,62	152k,7	150k.	150k.
	Quantité de charbon brûlé par cheval et par heure aux essais	C	0k,956	0k,796	0k,872	1k,0	1k,07
I Eléments qui dépendent de la pression de timbre II, et dont le poids par m2 de grilles doit être rapporté à cette pression II.	Chaudières principales, sans les barreaux de grille ni la maçonnerie		185930k.	138687k	78319k.	236100k.	137210k.
	Soupapes d'arrêt, de sûreté, de décharge, détendeurs, épurateurs, surchauffeurs		17101	14550	11031	12000	10000
	Tuyautage et robinetterie des chaufferies		17129	18610	8082	44000	34000
	Total des poids I	P_1	220160k.	171847k.	97432k	292100k.	181210k.
	Rapport	$\frac{P_1}{G}$	3669k,3	2527k,30	2895k,21	2921k,00	2664k,85
	Rapport	$\frac{P_1}{CII}$	244 ,6	168 ,47	193k,01	194k,73	177k,65
II Eléments qui dépendent de l'intensité de la chauffe, c'est-à-dire de la quantité de charbon K brûlé par m2 de grilles ou de la quantité d'eau vaporisée par m2 de grilles; le total de ces poids, par m2 de grilles, doit être rapporté à la combustion K.	Pompes alimentaires		8420k.	5200k.	9500k.	11700k.	4300k.
	Bâches des pompes alimentaires et caisses de réserve		3403	3030	1860	6000	4200
	Réchauffeurs d'eau d'alimentation		»	»	»	1000	»
	Filtres à éponges, appareils de purification de l'eau, caisses à eau de chaux		321	2634	1135	1850	1300
	Bouilleurs pour réparation des pertes		4153	2917	2050	5600	3900
	Eau des bâches, des caisses d'alimentation et des appareils précédents		34790	9750	3660	21000	15000
	Ventilateurs ou machines soufflantes pour le tirage forcé		5050	4872	1511	6800	4600
	Appareils de réchauffage d'air		»	»	»	»	»
	Total des poids II	P_2	56137k.	28403k.	19716k.	53950k.	31300k.
	Rapport	$\frac{P_2}{C}$	935k,60	417k,69	617k,09	539k,5	460k,2
	Rapport	$\frac{P_2}{GK}$	6 ,36	3, 58	3 ,82	3 ,60	3 ,68
III Eléments indépendants à la fois de II et de K, qui doivent être simplement rapportés à la surface de grilles G.	Eau des chaudières		50000k.	54000k.	27200k	82400k.	53000k.
	Grilles, maçonnerie et autels		40545	34574	19945	73000	52000
	Cheminées, conduits de fumée, boîtes à fumée		17200	67435	9068	60400	37500
	Feutrage et enveloppes isolantes quelconques		8000	3245	4780	10000	7000
	Outillage et rechanges		8350	7567	3326	11000	7000
	Parquets et échelles des chaufferies		8798	12116	4079	18000	14000
	Total des poids III	P_3	132893k.	178937k	68398k.	254800k.	170500k.
	Rapport	$\frac{P_3}{G}$	2214,88	2631,42	2140,70	2548,00	2507k,35
Résumé	Poids total	$P_1 + P_2 + P_3$	409190k.	369187k.	185546k.	600850k.	383010k.
	Poids total par m2 de grilles A	$\frac{P_1+P_2+P_3}{G}$	6819k,83	5429k,22	5807k,38	6008k,50	5632k,50
	Puissance en chevaux réalisée aux essais par m2 de grilles B	$\frac{F}{G}$	153chx,8	146chx,5	174chx,8	150chx,0	139chx,7
	Poids total par cheval D	$\frac{P_1+P_2+P_3}{F} = \frac{AC}{K}$	44k,35	37k,06	33k,17	40k,06	40k,31

* D'après les prévisions.

CHAUDIÈRES NICLAUSSE

			Friant
Indications générales	Timbre des chaudières	II	15k
	Surface de grilles totale	C	72m.q.,72
	Surface de chauffe totale	S	2159m.q.
	Puissance en chevaux réalisée aux essais	F	9563 chx
	Quantité de charbon brûlé par mètre carré de grilles	K	122k
	Quantité de charbon brûlé par cheval et par heure aux essais	C	0 ,911
I — Eléments qui dépendent de la pression de timbre II, et dont le poids par m² de grilles doit être rapporté à cette pression II.	Chaudières principales, sans les barreaux de grille ni la maçonnerie		184183k
	Soupapes d'arrêt, de sûreté, de décharge, détendeurs, épurateurs, surchauffeurs		169
	Tuyautage et robinetterie des chaufferies		18690
	Total des poids II	P_1	203042k
	Rapport	$\frac{P_1}{G}$	2792
	Rapport	$\frac{P_1}{GII}$	186 ,14
II — Eléments qui dépendent de l'intensité de la chauffe, c'est-à-dire de la quantité de charbon K brûlé par m² de grilles ou de la quantité d'eau vaporisée par m² de grilles; le total de ces poids, par m² de grilles, doit être rapporté à la combustion K.	Pompes alimentaires		6418k
	Bâches des pompes alimentaires et caisses de réserve		5304
	Réchauffeurs d'eau d'alimentation		»
	Filtres à éponges, appareils de purification de l'eau, caisses à eau de chaux		488
	Bouilleurs pour réparation des pertes		3685
	Eau des bâches, des caisses d'alimentation et des appareils précédents		26930
	Ventilateurs ou machines soufflantes pour le tirage forcé		4654
	Appareils de réchauffage d'air		»
	Total des poids II	P_2	47479k
	Rapport	$\frac{P_2}{G}$	652 ,9
	Rapport	$\frac{P_2}{GK}$	5 ,351
III — Eléments indépendants à la fois de II et de K, qui doivent être simplement rapportés à la surface de grilles G.	Eau des chaudières		46000k
	Grilles, maçonnerie et autels		33000
	Cheminées, conduits de fumée, boîtes à fumée		23400
	Feutrage et enveloppes isolantes quelconques		»
	Outillage et rechanges		7500
	Parquets et échelles des chaufferies		8600
	Total des poids III	P_3	118500k
	Rapport	$\frac{P_3}{G}$	1629
Résumé	Poids total	$P_1+P_2+P_3$	369021k
	Poids total par m² de grilles	$A=\frac{P_1+P_2+P_3}{G}$	5074 ,54
	Puissance en chevaux réalisée aux essais par m² de grilles	$B=\frac{F}{G}$	131chx,5
	Poids total par cheval	$D=\frac{P_1+P_2+P_3}{F}=\frac{AC}{K}$	39k,9

CHAUDIÈRES DU TEMPLE

			Dragon Grenadier Lancier	Averne Dauphin	Flibustier Ariel Du Temple-Normand
Indications générales	Timbre des chaudières	H	12k,00	14k,00	14k,00
	Surface de grilles totale	G	7m2,56	7m2,10	6m2,20
	Surface de chauffe totale	S	269m2,20	249m2,20	287m2,80
	Puissance en chevaux réalisée aux essais	F	1870 chx.	2210 chx.	2618 chx.
	Quantité de charbon brûlé par mètre carré de grilles	K	238k	298k	309k,67
	Quantité de charbon brûlé par cheval et par heure aux essais	C	0 ,906	0 ,957	0 ,733
I Eléments qui dépendent de la pression de timbre H, et dont le poids par m2 de grille doit être rapporté à cette pression H.	Chaudières principales, sans les barreaux de grille ni la maçonnerie		15350k.	12053k.	15938k.
	Soupapes d'arrêt, de sûreté, de décharge, détendeurs, épurateurs, surchauffeurs				
	Tuyautage et robinetterie des chaufferies		2762	1380	1260
	Total des poids I	P_1	18112k	13433k	17198k
	Rapport	$\frac{P_1}{G}$	2395k,7	1892k,0	2773k,9
	Rapport	$\frac{P_1}{GH}$	199 ,6	135 ,14	198 ,13
II Eléments qui dépendent de l'intensité de la chauffe, c'est-à-dire de la quantité de charbon K brûlé par m2 de grilles ou de la quantité d'eau vaporisée par m2 de grilles; le total de ces poids, par m2 de grilles, doit être rapporté à la combustion K.	Pompes alimentaires		259k.	326k.	259k.
	Bâches des pompes alimentaires et caisses de réserve		156	661	155
	Réchauffeurs d'eau d'alimentation		744	852	744
	Filtres à éponges, appareils de purification de l'eau, caisses à eau de chaux		»	212	»
	Bouilleurs pour réparation des pertes		111	113	110
	Eau des bâches, des caisses d'alimentation et des appareils précédents		1995	1970	1365
	Ventilateurs ou machines soufflantes pour le tirage forcé		220	298	440
	Appareils de réchauffage d'air		»	»	»
	Total des poids II	P_2	3495k.	4432k.	3073k.
	Rapport	$\frac{P_2}{G}$	462k,3	624k,2	495k,6
	Rapport	$\frac{P_2}{GK}$	1 ,94	2 ,09	1 ,60
III Eléments indépendants à la fois de H et de K, qui doivent être simplement rapportés à la surface de grilles G.	Eau des chaudières		1900k.	2694k.	4280k
	Grilles, maçonnerie et autels		2250	2518	2990
	Cheminées, conduits de fumée, boîtes à fumée		500	1340	500
	Feutrage et enveloppes isolantes quelconques		865	426	1364
	Outillage et rechanges		200	270	450
	Parquets et échelles des chaufferies		500	390	500
	Total des poids III	P_3	6215k.	7638k.	9460k.
	Rapport	$\frac{P_3}{G}$	822k	1075k,8	1525k,8
Résumé	Poids total	$P_1 + P_2 + P_3$	27822k.	25503k.	29731k.
	Poids total par m2 de grilles	$A = \frac{P_1+P_2+P_3}{G}$	3680k	3592k	4795k
	Puissance en chevaux réalisée aux essais par m2 de grilles	$B = \frac{F}{G}$	247chx	311chx	422chx
	Poids total par cheval	$D = \frac{P_1+P_2+P_3}{F} = \frac{AC}{K}$	14k,8	11k,5	11k,3

CHAUDIÈRES NORMAND

			Torpilleurs 148-149 152-153	Torpilleurs 182 à 185
Indications générales	Timbre des chaudières	II	14k	14k
	Surface de grilles totale	G	3m²,32	3m²,60
	Surface de chauffe totale	S	176m²	170m².9
	Puissance en chevaux réalisée aux essais.	F	1192ch.	1620ch
	Quantité de charbon brûlé par mètre carré de grilles	K	331k,30	332k,50
	Quantité de charbon brûlé par cheval et par heure aux essais	C	0k,887	0k,738
I Eléments qui dépendent de la pression de timbre II, et dont le poids par m² de grilles doit être rapporté à cette pression II	Chaudières principales, sans les barreaux de grille ni la maçonnerie Soupapes d'arrêt, de sûreté, de décharge, détendeurs, épurateurs, surchauffeurs		8128k	8830
	Tuyautage et robinetterie des chaufferies		402	453
	Total des poids II	P_1	8530k	9283k
	Rapport	$\frac{P_1}{G}$	2569,3	2578,6
	Rapport	$\frac{P_1}{CII}$	214,1	184,2
II Eléments qui dépendent de l'intensité de la chauffe, c'est-à-dire de la quantité de charbon K brûlé par m² de grilles ou de la quantité d'eau vaporisée par m² de grilles; le total de ces poids, par m² de grilles, doit être rapporté à la combustion K.	Pompes alimentaires		130	140
	Bâches des pompes alimentaires et caisses de réserve		207	145
	Réchauffeurs d'eau d'alimentation		433	486
	Filtres à éponges, appareils de purification de l'eau, caisses à eau de chaux		»	»
	Bouilleurs pour réparation des pertes		74	115
	Eau des bâches, des caisses d'alimentation et des appareils précédents		800	850
	Ventilateurs ou machines soufflantes pour le tirage forcé		269	220
	Appareils de réchauffage d'air		»	»
	Total des poids	P_2	1913k	1956k
	Rapport	$\frac{P_2}{G}$	576k,2	543k,3
	Rapport	$\frac{P_2}{GK}$	1 ,74	1 ,65
III Eléments indépendants à la fois de II et de K, qui doivent être simplement rapportés à la surface de grilles G.	Eau des chaudières		2700k	2700k
	Grilles, maçonnerie et autels		1293	1360
	Cheminées, conduits de fumée, boîtes à fumée		396	440
	Feutrage et enveloppes isolantes quelconques		227	252
	Outillage et rechanges		280	200
	Parquets et échelles des chaufferies		116	152
	Total des poids III	P_3	5012k	5104k
	Rapport	$\frac{P_3}{G}$	1509	1417,8
Résumé	Poids total	$P_1+P_2+P_3$	15455k	16343k
	Poids total par m² de grilles, A	$\frac{P_1+P_2+P_3}{G}$	4655	4539k
	Puissance en chevaux réalisée aux essais par m² de grilles, B	$\frac{F}{G}$	359ch	450ch
	Poids total par cheval D	$\frac{P_1+P_2+P_3}{F}=\frac{AC}{K}$	12k,9	10k

CHAUDIÈRE THORNYCROFT

			Véloce
Indications générales	Timbre des chaudières	II	14k
	Surface de grilles totale	G	7m²,06
	Surface de chauffe totale	S	383m²,32
	Puissance en chevaux réalisée aux essais	F	»
	Quantité de charbon brûlé par mètre carré de grilles	K	300k
	Quantité de charbon brûlé par cheval et par heure aux essais	C	»
I Eléments qui dépendent de la pression de timbre Π, et dont le poids par m² de grilles doit être rapporté à cette pression Π.	Chaudières principales, sans les barreaux de grille ni la maçonnerie		14400k
	Soupapes d'arrêt, de sûreté, de décharge, détendeurs, épurateurs, surchauffeurs		594
	Tuyautage et robinetterie des chaufferies		1350
	Total des poids I	P_1	16344k
	Rapport	$\frac{P_1}{G}$	2315k
	Rapport	$\frac{P_1}{G\Pi}$	165 ,3
II Eléments qui dépendent de l'intensité de la chauffe, c'est-à-dire de la quantité de charbon brûlé par m² de grilles ou de la quantité d'eau vaporisée par m² de grilles; le total de ces poids, par m² de grilles, doit être rapporté à la combustion K.	Pompes alimentaires		conduites par la machine
	Bâches des pompes alimentaires et caisses de réserve		240k
	Réchauffeurs d'eau d'alimentation		»
	Filtres à éponges, appareils de purification de l'eau, caisses à eau de chaux		200
	Bouilleurs pour réparation des pertes		»
	Eau des bâches, des caisses d'alimentation et des appareils précédents		1450
	Ventilateurs ou machines soufflantes pour le tirage forcé		302
	Appareils de réchauffage d'air		»
	Total des poids II	P_2	2192k
	Rapport	$\frac{P_2}{G}$	310
	Rapport	$\frac{P_2}{GK}$	1 ,00
III Eléments indépendants à la fois de II et de K, qui doivent être simplement rapportés à la surface de grilles G.	Eau des chaudières		3840k
	Grilles, maçonnerie et autels		2810
	Cheminées, conduits de fumée, boîtes à fumée		464
	Feutrage et enveloppes isolantes quelconques		109
	Outillage et rechanges		1592
	Parquets et échelles des chaufferies		216
	Total des poids III	P_3	4031k
	Rapport	$\frac{P_3}{G}$	570 ,9
Résumé	Poids total	$P_1+P_2+P_3$	22567k
	Poids total par m² de grilles	$A=\frac{P_1+P_2+P_3}{G}$	3196
	Puissance en chevaux réalisée aux essais par m² de grilles	$B=\frac{F}{G}$	»
	Poids total par cheval	$D=\frac{P_1+P_2+P_3}{F}=\frac{AC}{K}$	»

161. — *Encombrement.* — De même que pour les chaudières tubulaires, nous avons réuni, dans un tableau, les chiffres qui donnent l'encombrement horizontal d'un certain nombre de chaudières tubuleuses de chaque type.

TYPES de chaudières	NOMBRE de foyers	NOMS des bâtiments	Projection horizontale de la chaudière c	Projection horizontale des grilles g	RAPPORT $\frac{c}{g}$
			m²	m²	
Belleville	1 foyer	Alger	4,72	2,92	1,71
		Latouche-Tréville	6,51	4,03	1,61
		Bugeaud	5,10	3,20	1,59
		Bouvet	5,57	3,30	1,69
		Charlemagne. Gaulois	8,36	5,33	1,57
Oriolle	2 foyers	Zouave	5,04	2,92	1,72
	1 foyer	Torpilleurs 161 à 163	3,90	2,25	1,73
D'Allest	2 foyers	Bombe	9,95	4,70	2,06
		Jemmapes	12,87	7,50	1,71
		Chasseloup-Laubat	11,97	6,40	1,87
		Cassini	12,40	7,24	1,71
		Carnot	15,60	8,40	1,86
		Du Chayla			
Niclausse	1 foyer	Friant	24,743	17,04	1,46
		Elan	4,14	1,99	2,09
Du Temple	1 foyer	Dragon	7,28	3,78	1,92
		Averne	7,038	3,55	1,98
		Torpilleurs 195 à 200	10,45	4,20	2,48
Du Temple-Normand	1 foyer	Flibustier	8,40	3,10	2,71
Normand	1 foyer	Torpilleurs 148, 149	11,25	3,32	3,39
		Torpilleurs 182 à 185	10,80	3,60	3,00
		Forban	11,97	4,10	2,92
Normand-Sigaudy	2 foyers	Château-Renault	21,73	9,54	2,27
		Dunois et Lahire	17,64	6,02	2,93
Guyot (Indret)	2 foyers	Jeanne-d'Arc	22,20	9,40	2,36
Thornycroft	1 foyer	Véloce	9,21	3,53	2,61
		Coureur	10,44	3,54	2,94

QUATRIÈME PARTIE

ACCESSOIRES DE CHAUDIÈRES

QUATRIÈME PARTIE

ACCESSOIRES DE CHAUDIÈRES

162. — *Classification des accessoires de chaudières.* — On comprend, sous le nom générique d'accessoires de chaudières, des objets de la nature la plus diverse et de l'emploi le plus varié. Les uns font partie de la construction même de la chaudière ; ils font corps avec elle, ou bien constituent son prolongement ; tels sont par exemple, les bouchons autoclaves et toutes les parties des foyers et des cheminées. D'autres sont des organes bien distincts ayant chacun leur fonction propre ; tels sont les accessoires destinés à l'émission de la vapeur et à l'alimentation d'eau, en y comprenant tous les appareils de sécurité. D'autres enfin sont de véritables accessoires, entièrement distincts de la chaudière même, dont ils peuvent se trouver très éloignés ; parmi ces derniers, quelques-uns sont des organes se rattachant à l'ensemble de l'appareil moteur, et non pas aux chaudières en particulier. Le condenseur est un accessoire de la machine, dont il augmente la puissance, et en même temps un accessoire de la chaudière, à laquelle il fournit l'eau douce indispensable ; il est d'usage de rattacher le condenseur à la machine ; on considère, au contraire, comme accessoires de chaudières, les autres organes ayant trait à l'alimentation.

Comme l'étude des organes ne peut pas se séparer de celle de leur fonctionnement nous avons déjà décrit un certain nombre d'accessoires, sur lesquels nous ne reviendrons pas ; de ce nombre sont les grilles, les outils de chauffe, les pulvérisateurs de pétrole, les appareils destinés au tirage forcé, les divers dispositifs destinés à utiliser la chaleur de la fumée, soit en réchauffant l'eau d'alimentation, soit en chauffant l'air destiné à la combustion, etc.

L'étude complète des accessoires de chaudière et de leur construction

formerait, à elle seule, un véritable traité. Nous nous bornerons à des descriptions, et surtout à l'exposé des conditions à remplir et des moyens d'y satisfaire. La construction est surtout une affaire de pratique ; nous nous bornerons à dire qu'elle exige des soins minutieux et qu'il n'y a pas, dans les accessoires de chaudières, un seul détail qui puisse impunément rester en souffrance.

CHAPITRE XVI

ACCESSOIRES FORMANT COMPLÉMENT DE L'ENVELOPPE

163. — *Portes de visite. Bouchons autoclaves.* — Le corps de la chaudière proprement dit ne présente guère d'autre accessoire faisant partie de l'enveloppe que les portes de visite et leur garniture. Autrefois, sur les chaudières rectangulaires, les portes de visite pouvaient se distribuer à volonté sur toutes les faces ; les trous d'homme pour descendre dans le coffre à vapeur s'installaient alors commodément sur le ciel même. Avec les pressions actuelles, on ménage beaucoup le nombre et la grandeur des ouvertures, on évite de découper les enveloppes cylindriques, et l'on ne place de portes de visite que sur les façades des chaudières cylindriques et les deux fonds des collecteurs cylindriques des chaudières tubuleuses.

Les ouvertures dans les chaudières sont renforcées sur tout leur pourtour, par une collerette en tôle, ou mieux en cornière, qui compense plus ou moins l'effet de la découpure sur la solidité de l'enveloppe, et qui assure la raideur nécessaire au serrage du joint.

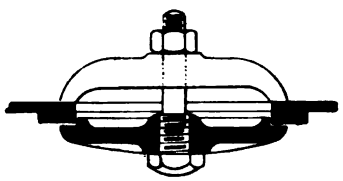


Fig. 181

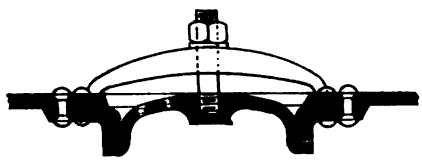


Fig. 182

Le bouchon est toujours autoclave, c'est-à-dire appliqué sur le joint par la pression même de la chaudière ; il est en fer forgé, placé en dedans de la chaudière, et tenu en place par un boulon serré sur une griffe appliquée à l'extérieur de la chaudière. La figure 181 représente une forme de portes et de bouchons autoclaves qui a été très longtemps adoptée ; la figure 182 représente la forme actuelle. Le progrès réalisé est impor-

tant; les bords du trou ont aujourd'hui beaucoup plus de raideur, et les surfaces de portage du joint sont beaucoup plus faciles à bien dresser.

164. — *Portes de foyers et de cendriers.* — Les portes de foyers sont percées de trous pour le passage de l'air, et munies de contre-plaques les préservant de la chaleur. Depuis quelques années on abandonne

Porte de foyer Martin

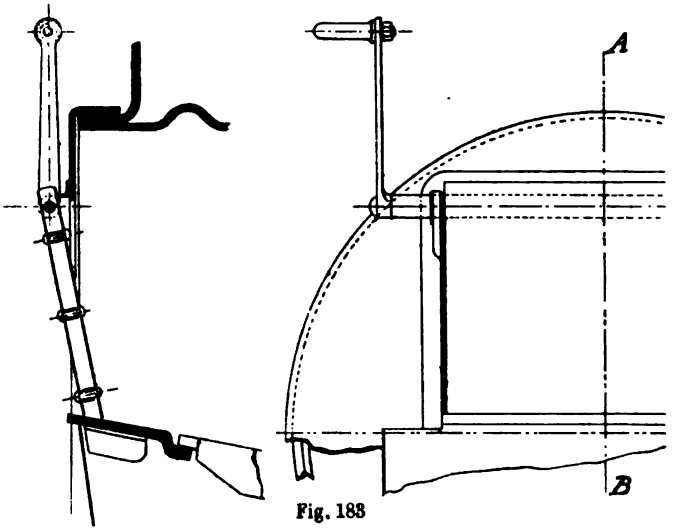


Fig. 183

Mouvement de porte de foyer de torpilleur

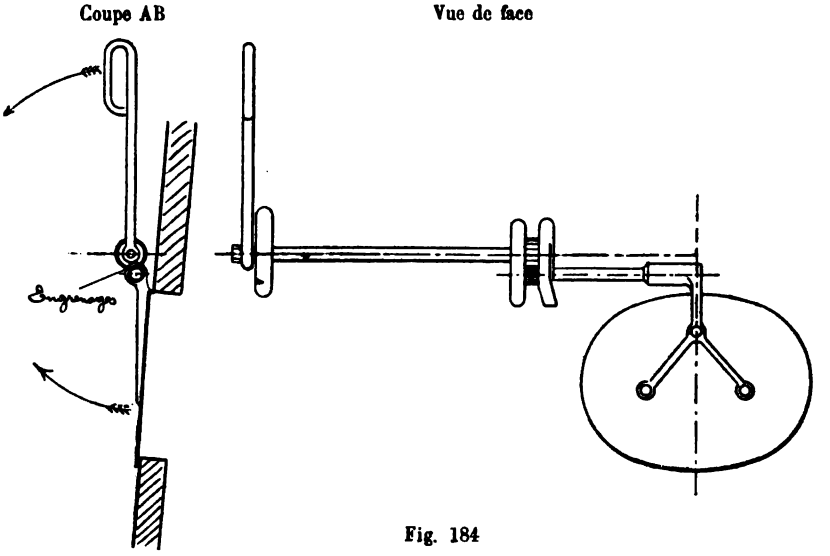


Fig. 184

l'ancien modèle, qui tournait sur des gonds verticaux et se fermait au loquet, pour la porte Martin, suspendue à une charnière horizontale et se fermant automatiquement. Le but de ce changement est de réduire le plus possible la durée de l'ouverture des portes.

Porte de cendrier de torpilleur

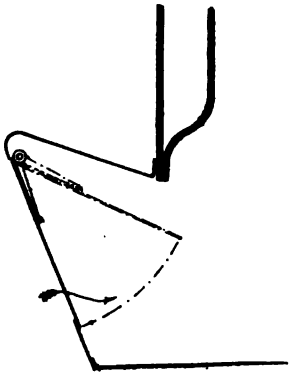


Fig. 185

Les nouvelles portes s'ouvrent vers l'intérieur; leur fermeture est donc autoclave, en même temps qu'automatique, ce qui leur assure des avantages de sécurité en cas de fuite intérieure de vapeur. Elles doivent être tenues ouvertes à la main; elles exigent donc la coopération de deux chauffeurs pour le chargement du charbon; il n'y a pas à cela d'inconvénient sérieux, parce qu'on ne charge jamais tous les foyers à la fois, et que l'homme tenant la porte levée n'a aucune fatigue à supporter.

Les portes de cendriers constituent un registre d'arrivée d'air; elles sont habituellement à deux vantaux, portant chacun une petite ouverture fermée par un papillon. Il est facile de construire les portes de cendriers, de manière à obtenir la fermeture automatique, pour éviter les projections en cas de fuite de vapeur; cette disposition est réglementaire en France pour les chaudières locomotives des torpilleurs, et elle tend à se généraliser. L'importance est moins grande que pour les portes de foyers, au point de vue de la sécurité, parce que les projections de flamme se produisent plus rarement par les portes de cendriers, à cause de la résistance de la grille et de la couche de charbon.

165. — *Cheminées. Enveloppes. Capots de cheminées.* — Sur les anciennes chaudières tubulaires, à enveloppes très robustes, auxquelles les coffres à fumée sont solidement boulonnés, les cheminées trouvent une base et un point d'appui à toute épreuve; elles s'élèvent dans leur écoutille, et se dilatent librement, sans qu'il y ait d'autres précautions à prendre que de donner au besoin un peu de mou à leurs haubans, lors de l'allumage. Les enveloppes de cheminée sont fixées, les unes à la coque, les autres à la cheminée; entre la portion coque et la portion cheminée, il peut y avoir contact, mais il n'y a jamais assemblage; le glissement doit toujours se faire sans être gêné; on ne rencontre à cela aucune difficulté de construction ni de fonctionnement. Telle est la disposition très simple qui se rencontre encore le plus souvent aujourd'hui, en particulier sur les paquebots.

L'adoption du tirage forcé en vase clos, en obligeant à disposer des appareils de fermeture dans les enveloppes, a introduit une légère complication. Sur les torpilleurs, on ferme simplement le sommet de l'enveloppe par une cornière ou une tôle emboutie, sur le rebord de laquelle la cheminée glisse en se dilatant; mais, sur les navires où l'enveloppe doit servir, en temps ordinaire, au dégagement de l'air chaud, il faut établir des volets mobiles; si la charnière et le siège se déplacent l'un par rapport à l'autre, le portage est nécessairement imparfait; comme le joint n'a aucun besoin d'être étanche, le déplacement relatif des diverses parties ne présente pas d'ailleurs grand inconvénient.

Cheminée de torpilleur

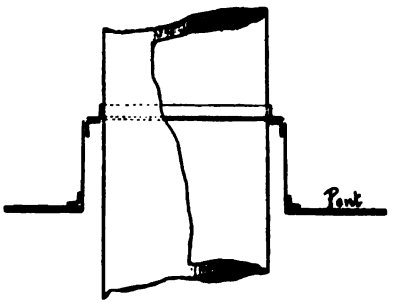


Fig. 186

Sfax

Enveloppe de cheminée avec fermeture à volets

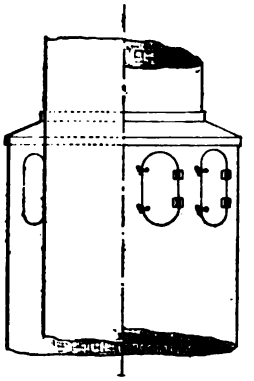


Fig. 187

Friant

Presse-étoupes de cheminée

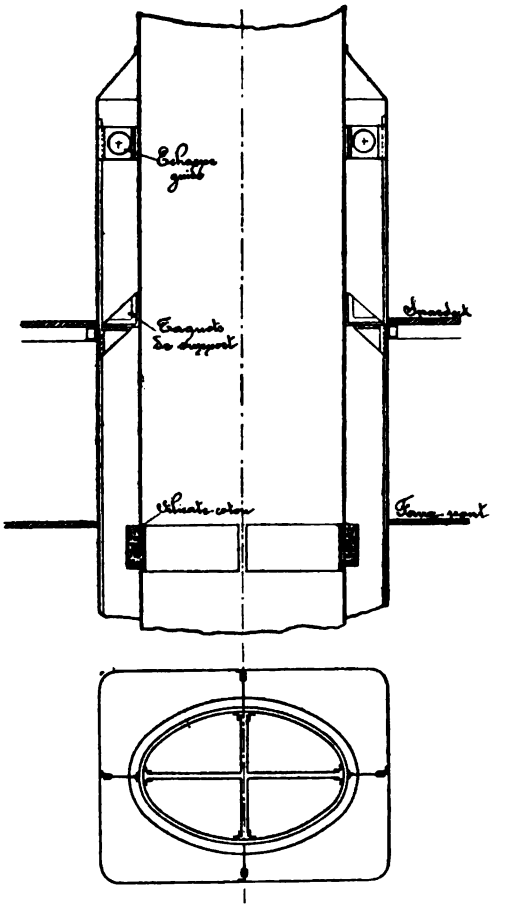


Fig. 188

L'introduction des chaudières tubuleuses, dont l'enveloppe en tôlerie très légère ne saurait supporter de grands efforts, a obligé de modifier

l'ancienne construction, et de reporter, sur la coque même, la charge de supporter la plus grande partie du poids de la cheminée et surtout la traction de ses haubans. Actuellement, on fait supporter par les chaudières la partie inférieure seulement de la cheminée, sur toute la hauteur où les grandes dilatations peuvent se produire. La partie supérieure de la cheminée, avec la totalité des enveloppes, et tous les accessoires de fermeture, forme une charpente unique de tôlerie rivée sur l'entourage des écoutilles qu'elle traverse. Les deux parties de la cheminée ainsi sectionnée sont emmanchées l'une dans l'autre, avec un joint glissant très simple, garni d'amiante, de silicate-coton ou seulement de fraisil; la figure 188 représente la disposition de ce genre qui a été adoptée sur le *Friant*. Toute la partie haute de la cheminée, ainsi enracinée sur la coque, est devenue, en droit strict, un accessoire de coque, au lieu d'être un accessoire de chaudière.

Charles-Martel

Capot de cheminée

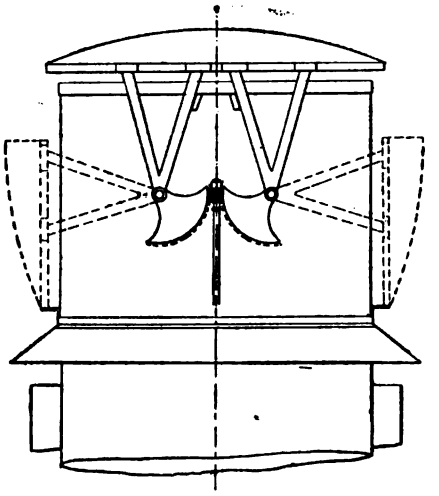


Fig. 189

L'orifice supérieur des cheminées doit, pendant les périodes de chômage, être fermé par un capot qui le préserve de la pluie; en effet, la suie, qui à sec constitue un bon enduit préservateur, devient au contraire, quand elle est mouillée, un véritable agent de destruction de la tôle. Sur les bâtiments à mâture, on s'est contenté longtemps de capots en toile, que l'on mettait en place en les suspendant à un étai. Actuellement on dispose d'ordinaire un opercule en tôle, qui tourne autour d'une

charnière, et qui se manœuvre du pont, à l'aide de chaines ou de tiges, comme on le voit sur la figure 189. On a essayé aussi des volets flexibles en tôle très mince, s'enroulant sur un cylindre, et se déroulant à la fermeture ; le poids beaucoup trop élevé de ces derniers appareils en a fait abandonner l'emploi.

sente les deux coupes, et qui s'est montrée peu efficace. On a essayé à la même époque un surchauffeur Lafond (fig. 203), composé de grands tubes recourbés qui occupaient le pourtour intérieur de la cheminée ; cet appareil lourd, encombrant, d'un rendement à peu près nul, n'a pas tardé à être débarqué.

La mauvaise conductibilité de la vapeur, qui oblige à donner aux surchauffeurs de grandes surfaces et de grands volumes, et l'importance, à bord, des questions de poids et d'encombrement, ont conduit à abandonner actuellement les surchauffeurs de vapeur, malgré les avantages théoriques reconnus de la surchauffe.

Surchauffeur Ludwig et Weber

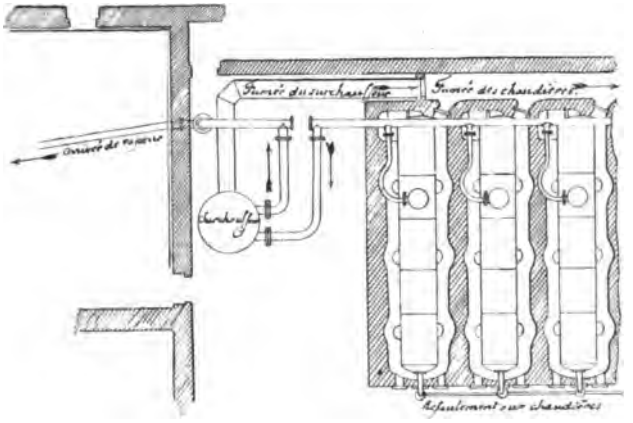


Fig. 204

A terre, où l'on est moins gêné par l'espace et le poids, les essais de surchauffe ne sont pas abandonnés. La figure 204 représente un dispositif essayé par MM. Ludwig et Weber à Logelbach en 1893, dans lequel la vapeur produite dans une chaudière est surchauffée dans une seconde chaudière privée d'eau.

L'adoption des surchauffeurs dans la marine appellerait la création d'un accessoire, qui n'existe pas encore, et qui serait nécessaire pour limiter l'échauffement maximum de la vapeur pendant les stoppages.

CHAPITRE XVIII

ACCESSOIRES RELATIFS A L'ALIMENTATION ET A TOUT CE QUI CONCERNE L'EAU DES CHAUDIÈRES

173. — *Tubes de niveau.* — *Robinets-jauges.* — La hauteur du niveau de l'eau doit être l'objet d'une surveillance toute particulière dans les chaudières marines, non seulement dans les chaudières tubuleuses, mais aussi dans les chaudières cylindriques, parce que l'importance de la question de poids conduit à réduire le plus possible le volume d'eau. Dans les chaudières cylindriques, on tient le niveau normal à $0^m,20$ de hauteur, au plus, au-dessus du courant de flamme. La plupart des accidents graves, dont on a pu déterminer les causes, étaient dus à l'abaissement du niveau. Ainsi sur le torpilleur 122, où la déchirure du ciel du foyer a amené la mort du chauffeur, et il a été établi que les tubes de niveau ne fonctionnaient pas. Sur le *Wattignies*, il est également prouvé qu'au moment où l'un des foyers Fox s'est écrasé, le niveau de l'eau était très bas.

Le niveau s'observe principalement dans un tube en verre appelé tube de niveau.

Dans les tubes de niveau, il importe que l'eau soit à l'abri de l'agitation produite par l'ébullition, qu'elle soit exempte de matières en suspension pouvant se déposer sur la paroi, enfin que la température soit peu élevée, afin d'éviter la rupture par refroidissement dans les courants d'air de la chaufferie. Afin de réaliser ces conditions, on place le tube non pas sur la chaudière même, mais sur une colonne en bronze appelée *clarinette*, séparée de la chaudière, avec laquelle elle communique par deux tuyaux en cuivre rouge assez longs, allant, l'un en haut dans la vapeur, l'autre en bas dans l'eau ; ces deux tubes sont quelquefois munis de robinets. La clarinette porte souvent deux tubes de niveau de longueur différente (fig. 205).

Le tube en verre est placé dans une armature en bronze, à deux tu-

bulures ouvrant dans la clarinette. Les deux tubulures sont munies de robinets conjugués par une tringle, qui sont ouverts quand la clef est tournée vers le bas, afin de ne pas pouvoir se fermer d'eux-mêmes ; la partie supérieure porte un bouchon à vis pour l'introduction du tube, et la partie inférieure un robinet de purge ; deux petits presse-étoupes placés au passage du tube en verre complètent l'appareil.

Les soins à prendre consistent à tenir le tube propre, et tous les orifices bien dégagés ; il faut savoir fermer immédiatement les robinets en cas de rupture du tube, avant que la vapeur envahisse la chaufferie et qu'il se produise une panique, toujours à craindre avec les chauffeurs peu exercés.

Tube de niveau ordinaire

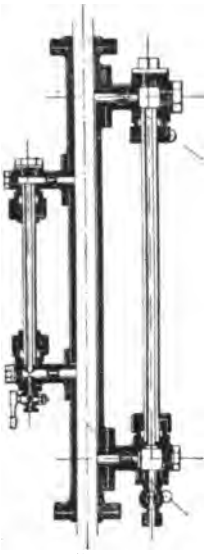


Fig. 205

Tube de niveau modèle Louppe

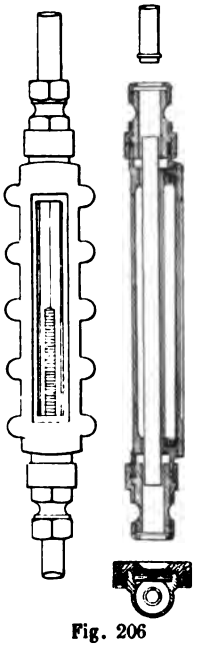


Fig. 206

Fermeture automatique Hopkinson

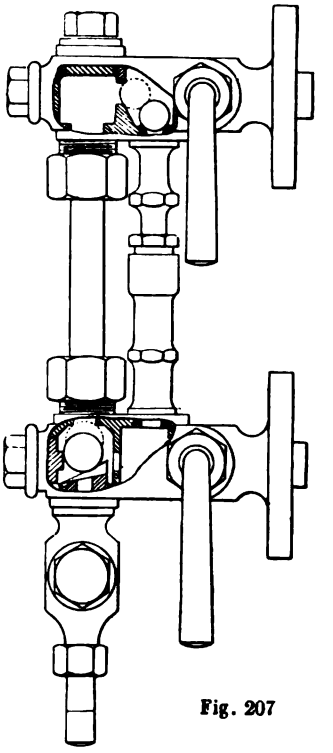


Fig. 207

Les deux genres de précautions propres à prévenir les dangers d'une rupture consistent à entourer le tube d'une seconde enveloppe, ou à le munir d'appareils de fermeture automatique. Comme exemple de tubes munis d'une double enveloppe, la figure 206 représente le tube Louppe, dans lequel le niveau ne s'observe qu'à travers une glace; comme exemple de tubes à fermeture automatique, la figure 207 représente un modèle

muni de soupapes à boules se fermant par l'action d'un courant d'eau. Le premier système rend les observations difficiles ; le second laisse toujours place à des craintes d'obstruction intempestive des passages. On n'a rien trouvé jusqu'ici donnant pleine satisfaction.

Le niveau dans le tube n'est pas le même que dans la chaudière ; il existe, à cela, plusieurs raisons.

En premier lieu, l'eau de la clarinette et de ses tuyaux est plus froide, et par conséquent plus dense, que celle de la chaudière. Pour une différence de température de 100 degrés, le poids spécifique de l'eau varie dans le rapport 1,045 ; sur une colonne d'eau de 2 mètres de hauteur, on peut donc avoir une différence de niveau de 9 centimètres, le niveau étant plus bas dans le tube. La différence des températures n'atteint probablement pas 100 degrés ; mais il n'en est pas moins prudent de limiter la hauteur de la colonne d'eau dans la clarinette au-dessous de 2 mètres.

En second lieu, si l'eau de la chaudière s'est chargée de sels, comme la colonne de niveau et les tubes se remplissent toujours plus ou moins d'eau douce, par suite des condensations de vapeur, un effet inverse au précédent tend à se produire sur les densités. Si, par exemple, l'eau de la chaudière marquant deux degrés au saturomètre, l'eau extérieure était entièrement douce, le rapport des poids spécifiques serait 1,052, et alors, pour une hauteur de colonne de 2 mètres, le niveau marqué serait trop haut de $10^{cm},4$. La pureté des eaux, indispensable aux chaudières tubuleuses, y met à peu près à l'abri de cette cause d'altération des niveaux.

Ces deux causes d'erreur, de sens inverse l'une de l'autre, dans l'indication des tubes de niveau, sont les seules auxquelles on soit exposé dans les chaudières tubulaires ; leur conséquence finale peut être assez bien connue, si l'on a soin de contrôler l'observation des niveaux par les indications des robinets-jauges. Dans les chaudières tubuleuses, à l'intérieur desquelles l'eau est animée de mouvements rapides, une cause d'erreur plus grave résulte des différences de pression à l'intérieur de la chaudière faisant équilibre à l'inertie des colonnes d'eau en mouvement. C'est ainsi que dans la chaudière Belleville où le mouvement ascentionnel s'accélère à mesure que la proportion de vapeur est plus considérable, la pression dans les fonds subit un accroissement, qui se traduit par une élévation de l'eau dans le tube de niveau à $0^{m},10$ ou même $0^{m},20$ au-dessus du niveau dans la chaudière. Dans les chaudières D'Allest, il y a, de plus, déformation du niveau supérieur ; les indications des robinets-jauges elles-mêmes sont en défaut (fig. 130).

Les robinets-jauges, destinés principalement à contrôler de temps à

autre les indications des tubes de niveau, se placent au nombre de trois sur la façade des chaudières ; l'un est à la hauteur du niveau normal, le second à $0^m,10$ plus bas, le troisième à $0^m,10$ plus haut. Les robinets-jauges sont d'un entretien facile, et ne trompent jamais un chauffeur exercé ; pour un chauffeur novice, le jet qu'ils donnent paraît toujours être un jet de vapeur.

Le robinet-jauge inférieur sert accessoirement à prendre de l'eau pour mesurer la saturation de l'eau dans la chaudière.

Les rondelles fusibles, avertisseur final, quand la partie supérieure des courants de flamme vient à découvrir et à se surchauffer, ne sont pas, en règle générale, employées dans la marine. Leur fusion constitue une véritable avarie, à laquelle on ne peut porter remède qu'après avoir mis bas les feux ; un navire marchant avec une seule chaudière pourrait, dans certaines circonstances, être compromis par le fonctionnement d'un semblable appareil de sécurité.

Nous avons vu que l'emploi d'un bouchon fusible a été quelque temps prescrit, comme précaution complémentaire, sur les chaudières D'Allest ; ce bouchon n'avait pas été établi sur les chaudières du *Jauréguiberry*, où il n'aurait vraisemblablement pas fondu, d'ailleurs, avant le coup de feu qui a déterminé l'ouverture d'un tube.

Le sifflet d'alarme, ouvert par le mouvement d'un flotteur, n'a jamais été appliqué aux chaudières marines.

174. — *Arrivée de l'eau d'alimentation.* — *Régulateurs à main.* — Le choix du point d'arrivée de l'eau d'alimentation a une certaine importance.

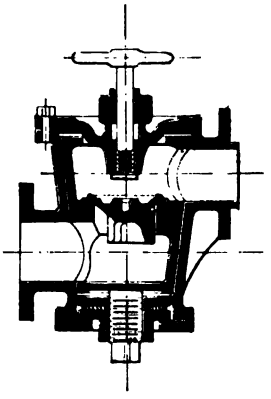


Fig. 208

En projetant l'eau en pluie fine dans la vapeur, on la purge d'air et on précipite immédiatement les sels insolubles à haute température, tels que le sulfate de chaux ; en la faisant arriver en masse dans le liquide, on peut produire des courants de circulation utiles, ou favoriser les courants naturels. Pour les chaudières cylindriques, la première solution est adoptée dans la Marine française, la seconde dans la Marine américaine. Parmi les chaudières tubuleuses, les chaudières Belleville présentent le premier système, et les chaudières Normand le second.

La décharge du tuyau d'alimentation dans le collecteur supérieur s'impose, sur les chaudières tubuleuses qui peuvent avoir un collecteur supérieur commun à plusieurs foyers, quand on veut utiliser cette propriété, pour composer des corps à alimentation unique,

et pour simplifier ainsi le tuyautage et la manœuvre des régulateurs d'alimentation.

Sur la façade même de la chaudière, près de l'entrée du tuyau d'eau, se trouve l'appareil destiné à régler le niveau.

Le niveau de l'eau se règle toujours en faisant varier simplement la section d'entrée; les pompes fournissent de l'eau en excès; le surplus de leur débit est renvoyé à la bâche par la soupape de trop plein de la boîte alimentaire.

L'appareil de réglage consiste le plus souvent dans une soupape appelée *régulateur d'alimentation*, dont l'eau soulève le siège pour pénétrer dans la chaudière, et qui s'oppose à tout mouvement de retour. On augmente ou on diminue à volonté la section de passage, en faisant monter ou descendre à la main le butoir de la soupape qui est manœuvré par une vis.

Dans le modèle d'Indret, actuellement adopté comme *régulateur à main*, la soupape est placée dans un robinet, comme l'indique la figure 208. En fermant le robinet, on isole la soupape de la chaudière, et on peut ainsi l'enlever pour la visiter et la nettoyer.

Un certain réglage à la main est toujours nécessaire, quand plusieurs chaudières sont desservies par une seule pompe et un seul tuyautage. En effet, s'il y a de petites différences dans la pression des diverses chaudières, comme cela se présente quelquefois, les soupapes se lèvent en grand pour les chaudières à faible pression et se ferment pour les autres; or il peut arriver que le besoin d'eau soit plus urgent dans les chaudières où la pression est faible, en même temps que les niveaux sont bas partout.

175. — *Régulateurs automatiques d'alimentation*. — On facilite beaucoup le service de l'alimentation, en faisant conduire automatiquement la soupape régulatrice par le mouvement d'un flotteur. Cette disposition est plus particulièrement utile sur les chaudières tubuleuses, où le moindre retard dans l'ouverture d'admission de l'eau amène des abaissements de niveau dangereux; elle est spécialement à recommander, sur les grands navires où plusieurs chaudières tubuleuses sont à surveiller à la fois.

Les régulateurs automatiques ont été introduits dans la marine par M. Belleville; la figure 209 représente le modèle, qui est actuellement en usage sur ses chaudières et qui n'a jamais beaucoup varié. La soupape est mue par un levier commandé par l'action contradictoire d'un ressort qui tend à la fermer, et d'un flotteur qui l'ouvre lorsque le niveau baisse. Une tige particulière actionne le levier, pour permettre

Chaudière Belleville.
Régulateur automatique d'alimentation

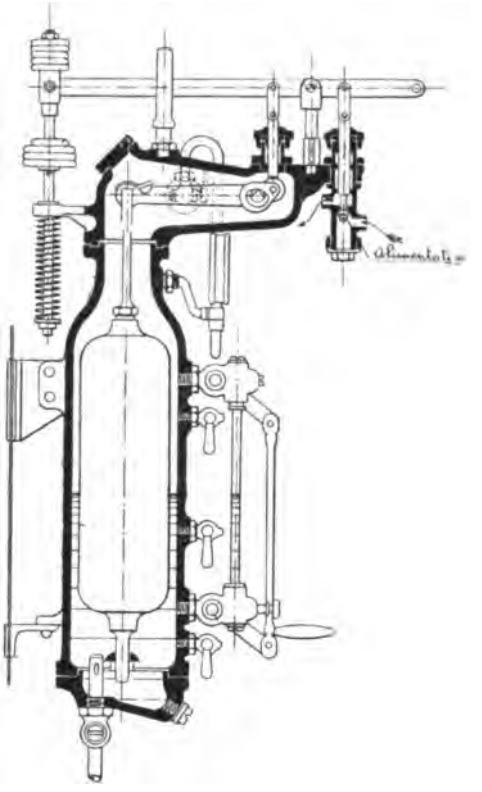


Fig. 209

l'ouverture à la main, quelle que soit la position du flotteur. La caisse du flotteur est placée sur la colonne de descente, qui ramène l'eau du séparateur au collecteur d'alimentation.

Un très grand nombre de modèles de régulateurs automatiques d'alimentation ont été mis en service, à la suite de l'extension prise par les chaudières tubuleuses.

M. Thornycroft place son régulateur tout entier, composé simplement d'une soupape équilibrée à double siège et d'un flotteur, à l'intérieur même du collecteur supérieur (fig. 210). Les frottements de tiges dans des presse-étoupes sont ainsi évités, au grand bénéfice de la sensibilité de l'appareil ; mais le réglage à la main ne paraît pas possible.

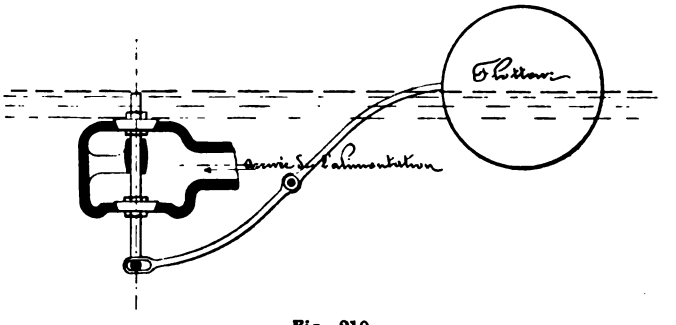


Fig. 210

Comme exemples de dispositions diverses, les figures 211, 211 *bis*, et 211 *ter*, représentent deux modèles, l'un à robinet, l'autre à tiroir, qui ont été successivement étudiés par M. Sigaudy pour les chaudières de la *Jeanne-d'Arc*, sans être d'ailleurs nouveaux.

Dans le modèle à robinet (fig. 211), le réglage à la main s'obtient en

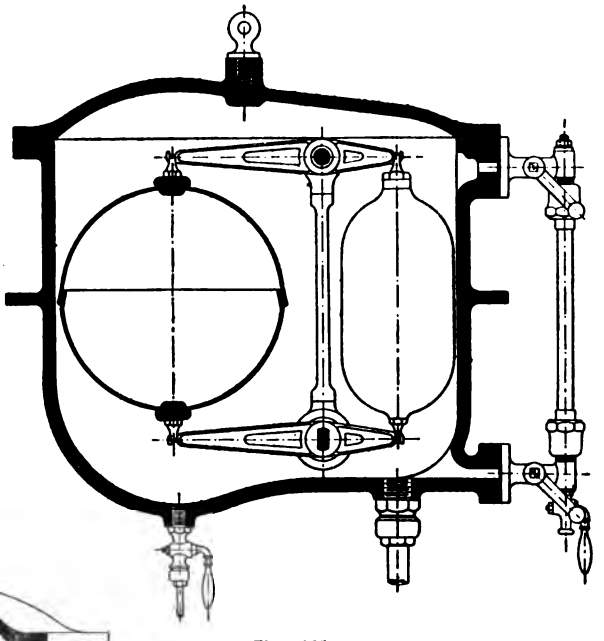


Fig. 211

faisant varier le calage d'un boisseau extérieur entourant le boisseau que le flotteur manœuvre (fig. 211 *bis*).

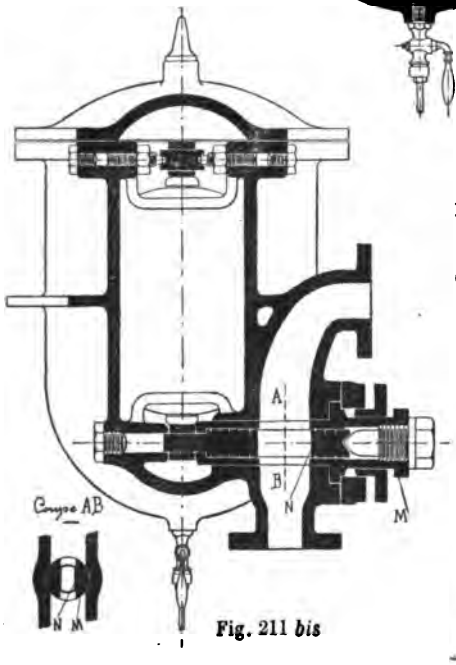


Fig. 211 *bis*

Dans le modèle à tiroir (fig. 211 *ter*), il suffit de faire varier la longueur de la tige du tiroir.

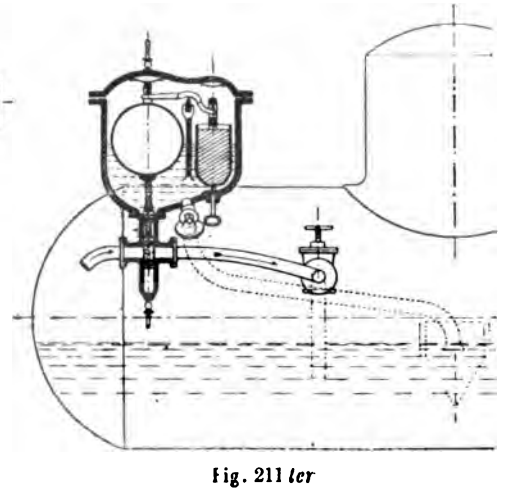


Fig. 211 *ter*

M. Messier, ingénieur des poudres et salpêtres a imaginé une disposition très originale, figure 212, dans laquelle le régulateur est commandé

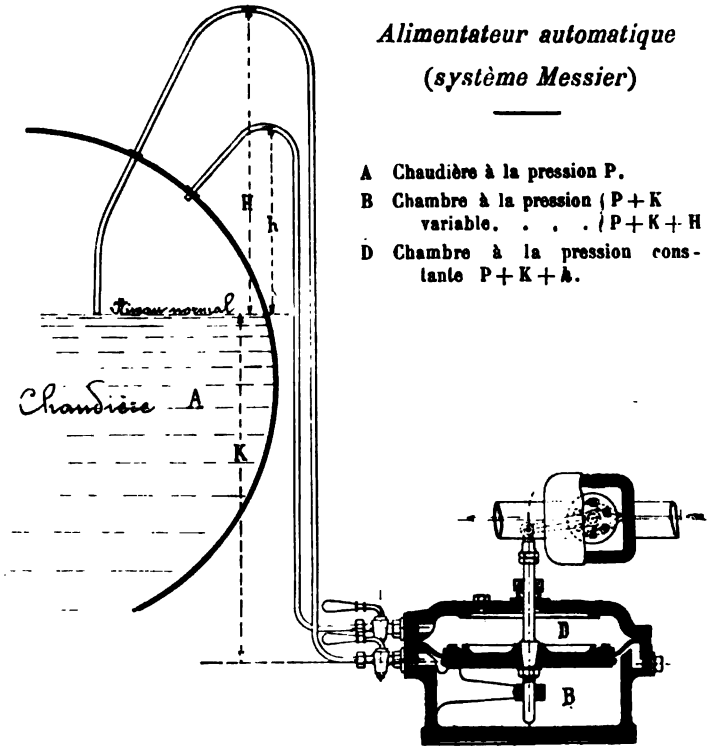


Fig. 212

par le mouvement d'un diaphragme; la face supérieure du diaphragme est soumise à une pression constante, tandis que la pression sur la face inférieure augmente de tout le poids de la colonne d'eau H, lorsque le niveau descend au-dessous de l'orifice inférieur du long tuyau, qui marque le niveau normal.

176. — *Saturation et saturomètres. Anciennes extractions continues.* — Quand on alimente une chaudière avec de l'eau chargée de sels, la concentration des sels s'opère par la distillation. L'eau atteint bientôt dans la chaudière un degré de saturation qui ne peut pas être dépassé. Il faut alors rejeter au dehors une quantité d'eau saturée, contenant autant de sels que l'eau alimentaire en introduit dans le même temps; c'est ce qu'on appelle faire extraction.

La concentraction des sels se détermine en mesurant le poids spécifique de l'eau à 95°, avec un petit aréomètre appelé *saturomètre*, ou

salinomètre. La graduation de l'instrument est telle qu'il marque 0° dans l'eau douce, 1° dans l'eau de mer, et ensuite autant de degrés que l'eau renferme de fois la quantité de sel contenue dans l'eau de mer.

Quand les chaudières étaient alimentées à l'eau de mer, on tenait la saturation à 3°, en faisant une *extraction continue*, par un tuyau muni d'un robinet; on réglait l'ouverture du robinet d'après la saturation observée. La perte de chaleur résultant de l'extraction continue était de 12 % environ de la chaleur totale communiquée à l'eau des chaudières, pour tenir la saturation à 3°; elle aurait été encore de 9,5 %, en tenant la saturation à 4°.

Quand les chaudières étaient alimentées à l'eau douce, avec réparation des pertes à l'eau de mer, on acceptait une saturation de 4°. La perte de chaleur, proportionnée à l'importance des pertes, était insignifiante.

177. — *Appareils d'extraction actuels. Appareils de vidange.* — Actuellement l'alimentation et la réparation à l'eau de mer sont également proscrites; les extractions ont perdu toute importance au point de vue des sels marins. Par contre, on se préoccupe beaucoup, et à juste titre, de débarrasser les chaudières de l'huile minérale, qui peut y être apportée par la vapeur et qui flotte alors à la surface de l'eau. Les anciennes extractions, qui se faisaient en prenant l'eau dans le fond de la chaudière, sont donc remplacées par des extractions de surface.

Hâleur
Trompe d'extraction flottante

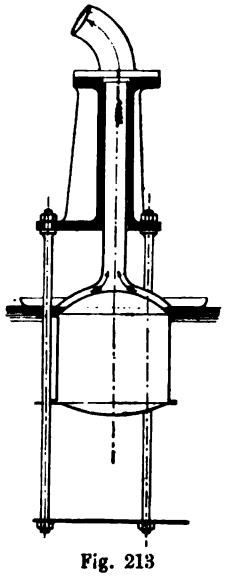


Fig. 213

L'extraction de surface doit se faire exactement à la surface; la prise d'eau doit donc être portée par un flotteur. La figure 213 représente un appareil construit sur ce principe, sous le nom de trompe flottante, et essayé à Brest sur le *Haleur*. L'extraction de surface doit être à peu près continue, puisque l'huile flotte peu de temps avant de se précipiter, comme on l'a vu au numéro 49.

Les appareils flottants ne sont applicables qu'aux chaudières cylindriques. Pour les chaudières tubuleuses, on a inventé en Angleterre et en Amérique des *boiler cleaner* de modèles variés; mais le seul moyen de préserver ces chaudières de la présence de l'huile paraît être dans l'épuration des eaux alimentaires, dont nous parlerons tout à l'heure.

Comme on est toujours exposé à introduire de l'eau de mer dans les

chaudières, à cause des fuites des condenseurs, des bouilleurs etc., on conserve toujours dans le fond des chaudières un appareil d'extraction de fond. Sur les chaudières munies d'un déjecteur, l'extraction de fond est naturellement sur le déjecteur.

Toutes les chaudières portent, à la partie la plus basse, un robinet de vidange dont le nom indique suffisamment l'emploi. Il convient, pour une raison de propreté, de ne pas faire écouler l'eau des chaudières à la cale. La vidange se fait à la mer, pour la plus grande partie possible, par l'extraction de fond; le reste de l'eau est ensuite envoyé par le robinet de vidange dans une caisse, d'où on l'extrait à l'aide d'une pompe.

178. — *Appareils de brassage de l'eau.* — Nous avons vu combien les enveloppes des chaudières cylindriques sont exposées à fatiguer pendant l'allumage, par suite des différences de température dues à la stagnation de l'eau dans le fond. L'absence de mouvement de l'eau est, de plus, défavorable à la transmission de la chaleur, puisque celle-ci se fait par convection et non par conductibilité. Par suite, diverses dispositions ont été imaginées pour produire mécaniquement l'agitation du liquide.

Hydrokineter

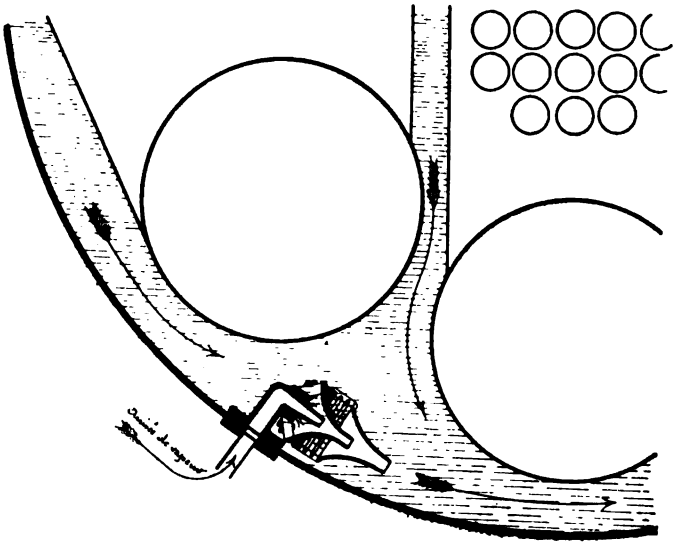


Fig. 214

Les premiers appareils essayés ont été les *hydrokineters*, sorte d'injecteurs Friedman, dans lesquels un jet de vapeur, lancé suivant l'axe d'une buse conique, produit l'entraînement de l'eau environnante; le courant artificiel ainsi obtenu est dirigé de manière à transporter l'eau

froide des fonds dans la région échauffée. Les hydrokineters sont d'une efficacité indiscutable, mais leur action est très lente : dans une chaudière de paquebot, chauffée avec la prudente lenteur des bâtiments de commerce, on avait observé que, quatre heures après l'allumage, la température de l'eau était de 96° à la surface et de 23° seulement dans le fond ; après l'établissement d'un hydrokineter, on a obtenu, dans les mêmes conditions et après le même temps, 96° à la surface et 62° dans les fonds ; il a fallu six nouvelles heures de chauffe, pour égaliser les températures partout. Les hydrokineters répondent mal, comme on voit, aux exigences du service, toujours pressé, de la Marine de guerre. Ces appareils ont de plus deux inconvénients graves : ils exigent que l'on ait une chaudière auxiliaire en pression ; ils cessent de fonctionner, dès que la température et la pression de la vapeur dont on dispose sont atteintes dans la chaudière, qu'il s'agit de faire marcher.

Dans la Marine américaine, on a substitué au jet de vapeur de l'hydrokineter un jet d'eau, qui n'est autre que l'alimentation dirigée suivant l'axe d'une buse conique. Dans ces conditions, l'appareil fonctionne efficacement pendant la marche, mais il reste au repos pendant la mise en pression, l'alimentation ne fonctionnant pas ; il fait donc défaut au moment où il serait le plus nécessaire.

Dispositions adoptées pour faire brasser l'eau des chaudières par l'eau d'alimentation

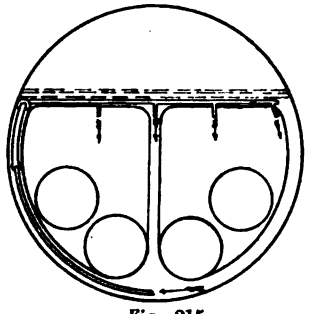


Fig. 215

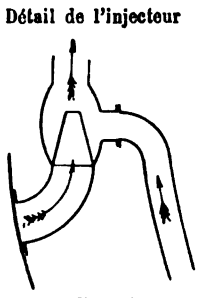


Fig. 217

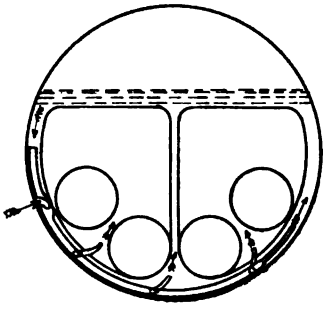


Fig. 216

Les barboteuses, imaginées à Indret par M. Garnier, remplissent bien toutes les conditions désirables. Ce sont de petites turbines placées en dehors de la chaudière, qui prennent l'eau dans les fonds et la déchargent un peu au-dessous du niveau. On fait tourner les barboteuses à bras pendant la mise en pression, et à la vapeur pendant la marche. Une dépense de travail de $1^{ch},5$ suffit pour donner un brassage énergique, dans une chaudière à deux ou à trois foyers. L'efficacité des barboteuses a été bien constatée, soit au point de vue de la fatigue de l'enve-

loppe pendant l'allumage, soit au point de vue de la production de vapeur pendant la marche. On a de plus observé qu'elles paraissent prévenir les coups de feu sur les ciels de foyers, et les fuites de tubes à la plaque de tête. L'emploi de ces appareils a été généralisé sur les chaudières cylindriques.

Isly

Pompe rotative pour brasser l'eau des chaudières

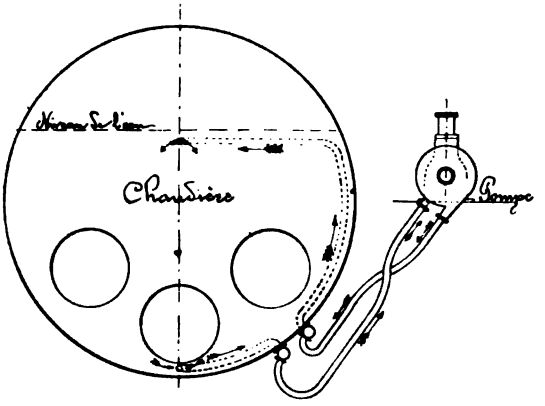


Fig. 218

179. — *Appareils de purification des eaux.* — L'eau des chaudières et l'eau d'alimentation contiennent des sels marins, des acides gras provenant de la décomposition du suif (quand les presse-étoupes sont graissés au suif), de l'huile minérale non décomposée, substances dont nous avons vu les effets nuisibles, sans parler de l'air dissous, qui est un agent de corrosion.

Les sels marins s'enlèvent, mais seulement après leur concentration, par les extractions de fond dont nous avons parlé; les sels de chaux se précipitent, dès l'arrivée à la chaudière, quand on alimente dans la vapeur. Il nous reste à décrire les appareils destinés à l'extraction ou à la neutralisation des autres substances.

Tout d'abord les réchauffeurs d'eau à la vapeur, qui ont été établis uniquement dans un but d'économie, et que nous décrirons au n° 183, font preuve de propriétés accessoires très utiles comme purificateurs, quand ils réchauffent par surface et non par mélange. Leurs parois, en effet, s'encrassent rapidement et exigent de fréquents nettoyages; tout ce qui s'en retire est sauvé par la chaudière. De plus, tout l'air qui a pu être repris par l'eau, depuis sa sortie du condenseur, se dégage dans les réchauffeurs, d'où on le fait sortir par des robinets spéciaux.

Le problème de l'extraction des acides gras n'a jamais été résolu. Quand, il y a une vingtaine d'années, on avait entrepris pour la première fois de neutraliser ces acides à l'aide de la chaux, un appareil spécial, pour injecter directement et automatiquement dans la chaudière une proportion de chaux convenablement dosée, avait été étudié par M. l'ingénieur Risbec, et rendu réglementaire dans la Marine. Cet appareil comprenait d'abord deux pompes foulantes, et offrait une certaine complication ; la figure 219 en représente une forme très simplifiée, qui a été étudiée en 1880, par M. Dudebout. Le mélange d'eau et de chaux est opéré dans un vase où l'eau est envoyée d'un réservoir à niveau constant ; le brassage est opéré par la circulation du liquide et le dégagement des bulles d'air. L'eau de chaux est ensuite appelée aux condenseurs par des tuyaux munis de robinets à fermeture automatique. Toute la manœuvre se borne à verser l'eau et la chaux dans la caisse de mélange.

Injection d'eau de chaux, système Risbec.
Appareil du **Dupetit-Thouars.**

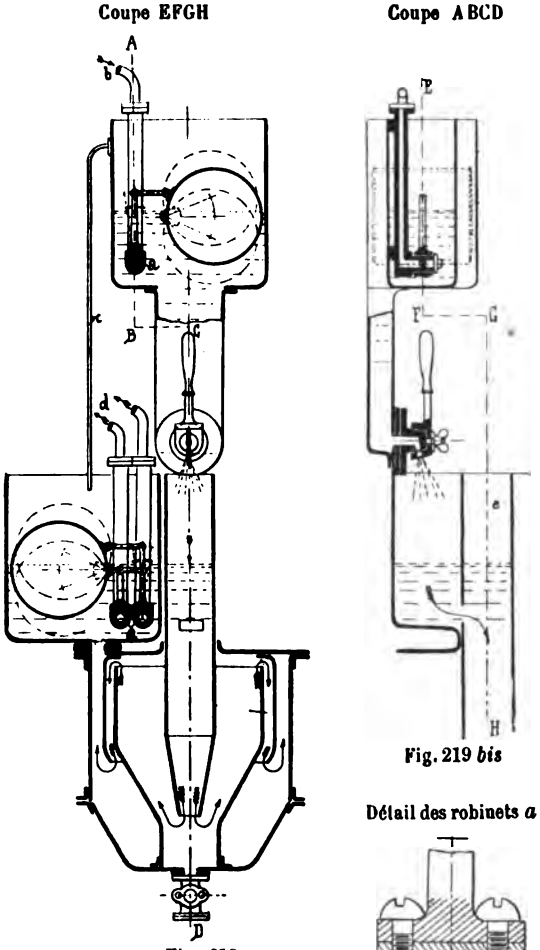


Fig. 219

a Arrivée d'eau munie d'un robinet commandé par un flotteur.
b Tuyau pris sur le refoulement de l'alimentation.
c Tuyau de trop plein.
d Tuyaux d'aspiration aux condenseurs.
e Tube dans lequel on introduit la chaux en poudre.

Fig. 219 *bis*

Détail des robinets *a*

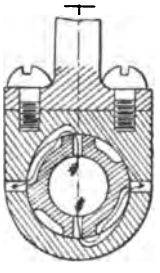


Fig. 219 *ter*

L'eau de chaux sert toujours pour le remplissage complet des chaudières tubuleuses en vue de leur conservation pendant les chô-

mages. On l'emploie souvent aussi en marche, en se servant d'ordinaire d'une simple caisse de mélange communiquant avec la bâche.

L'emploi des carbonates alcalins est complètement abandonné, comme on l'a vu au n° 76. A l'exception de la chaux, qui n'est pas elle-même sans inconvénient en marche, on évite, avec raison, l'addition de toute nouvelle substance chimique à celles, trop nombreuses, que les eaux renferment déjà.

180. — *Plaques de zinc. Electrogènes.* — Le principal moyen chimique, ou plutôt électro-chimique, actuellement en usage pour s'opposer à la corrosion du fer, consiste à suspendre des plaques de zinc, dans l'eau des chaudières, particulièrement près de l'arrivée d'eau d'alimentation, quand elle n'est pas dans le coffre à vapeur.

Le zinc a pour effet de neutraliser l'eau en absorbant les divers acides, de se substituer au fer pour produire la précipitation du cuivre, s'il s'en trouve à l'état de sels, enfin, et surtout, de produire un effet galvanique maintenant le fer à l'état électro-négatif et le rendant ainsi peu oxydable.

Afin de développer les effets galvaniques cherchés, on constitue une véritable pile à un seul liquide. Les rondelles de zinc sont reliées au fer à protéger, par des fils de cuivre, les contacts étant établis entre surfaces parfaitement décapées. Tout contact direct du zinc et du fer est évité avec soin; il est même bon d'entourer les plaques de zinc, d'un treillis retenant les fragments de métal attaqué, qui pourraient se détacher. La proportion adoptée entre les deux surfaces de zinc et de fer, est de 0,015, ce qui conduit à mettre jusqu'à 80 kilogrammes et même 100 kilogrammes de zinc par foyer, dans les chaudières cylindriques.

Fig. 220

On place quelques rondelles de zinc dans les bâches, citernes, et autres récipients, moins pour en protéger les parois, que pour y commencer la neutralisation des eaux.

Les rondelles de zinc, en raison de leur propriété principale ont reçu quelquefois le nom *d'électrogènes*, sous lequel les a désignées en particulier M. d'Hannay.

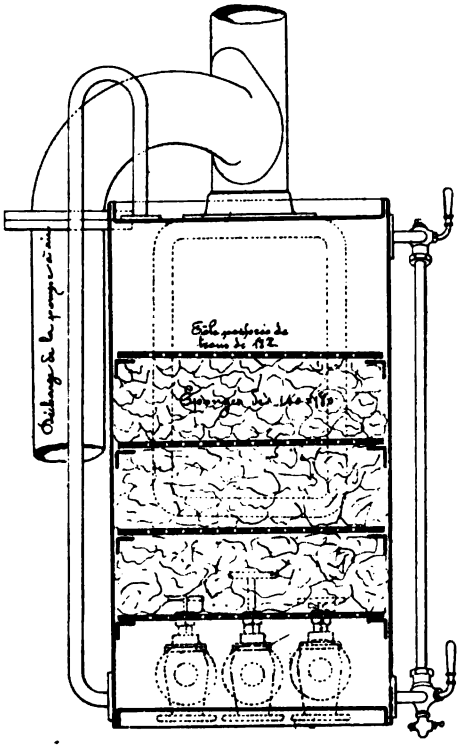
On attribue au zinc une action sur l'état physique des dépôts, qu'il rendrait moins durs et moins adhérents.

181. — *Extraction de l'huile minérale. Filtres à éponges.* — Pour résoudre le problème délicat de l'enlèvement de l'huile minérale, avant l'arrivée de l'eau à la chaudière, il faut avoir recours à des procédés

mécaniques, aucun agent chimique efficace connu n'ayant le pouvoir d'absorber et de précipiter cette huile.

Le seul appareil applicable aux machines de toutes dimensions est le filtre à éponges (fig. 221), que l'on fait traverser par l'eau alimentaire et dans lequel aspire la pompe alimentaire. Les éponges arrêtent bien l'huile minérale, tout en laissant passer l'eau; elles peuvent faire un service prolongé, à la condition de subir des lavages périodiques au savon noir ou à la potasse caustique. Le filtre est disposé avec des retours d'eau permettant de continuer l'alimentation pendant son nettoyage (fig. 222).

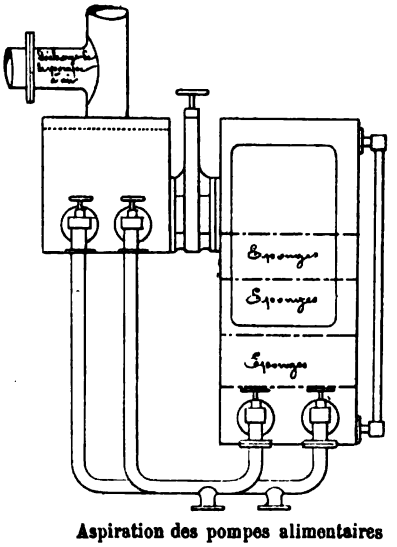
Filtre à éponges (*système Normand*)



Aspiration des pompes alimentaires

Fig. 221

Disposition permettant de changer les éponges sans arrêter l'alimentation



Aspiration des pompes alimentaires

Fig. 222

Le filtre à éponges a été employé pour la première fois en France par M. Normand, sur ses torpilleurs.

Le prix élevé des éponges les a fait remplacer, comme matière filtrante, par de simples balles de foin, dans les filtres des grands navires américains.

La pratique du filtrage des eaux conduit à une légère modification dans le mode de travail et de fonctionnement de la pompe à air. Il est utile, dans les grandes machines du moins, de placer le filtre sur le parcours du tuyau de décharge de la pompe à air, afin d'éviter tout travail d'aspiration aux pompes alimentaires.

182. — *Purificateurs de vapeur.* — Divers appareils de dégraissage ont été brevetés sous le nom d'*extracteurs de graisse* ou d'*éliminateurs d'huile*; les seuls intéressants, parce que leur principe est rationnel, sont ceux qui opèrent sur la vapeur elle-même, dans son trajet du cylindre au condenseur.

Les *purificateurs* de vapeur sont analogues aux *épurateurs*, et fonctionnent de la même manière, en imprimant au courant un mouvement curviligne, qui projette sur les parois toutes les particules liquides douées d'inertie. La forme donnée aux parois est beaucoup plus compliquée que dans les épurateurs; les deux figures 223 et 224 représentent deux modèles, l'un vertical, l'autre horizontal, et sont suffisamment claires pour dispenser de toute explication.

Eliminateurs d'huile
(système de Rycke)

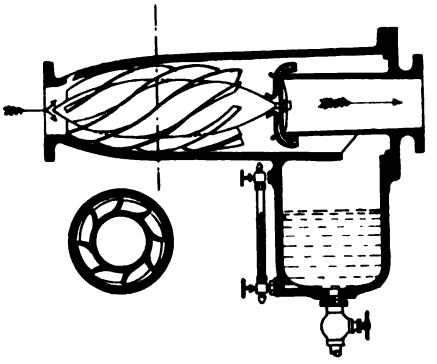


Fig. 223

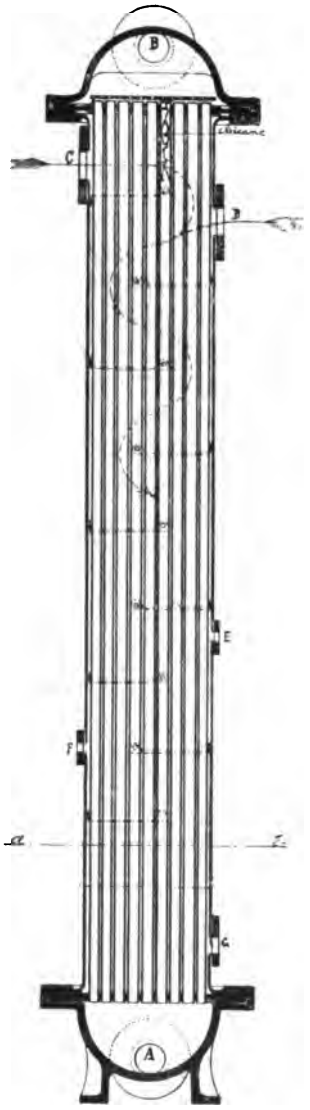
Fig. 224

Ces appareils peuvent convenir à certains petits navires; mais, sur le tuyau d'émission des grandes machines, ils atteindraient des dimensions vraisemblablement excessives.

183. — *Réchauffeurs à vapeur de l'eau d'alimentation. Calcul de leur utilité théorique.* — Les réchauffeurs à vapeur sont de véritables petits

Réchauffeur d'eau d'alimentation

Coupe CD



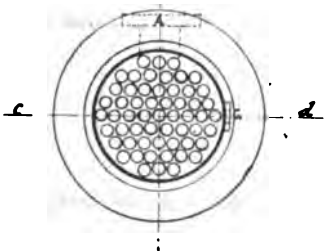


Fig. 225

Réchauffeur Wainwright

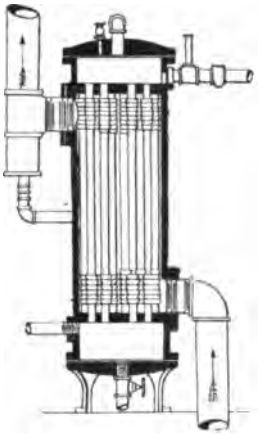


Fig. 226

Réchauffeur Weir

Disposition à injection

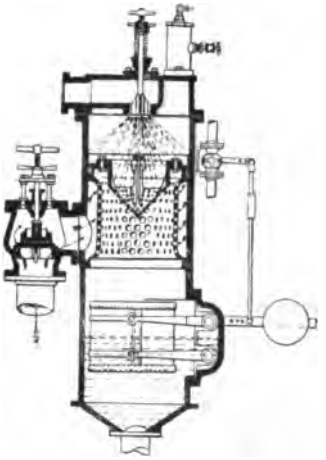


Fig. 227

Légende de la figure 225.

A Arrivée de l'eau d'alimentation.
B Sortie de l'eau d'alimentation.
C Prise de vapeur au réservoir B. P.
D Communication avec le collecteur d'échappement des appareils auxiliaires.
E Robinet d'équilibre de pression.
F Robinet d'air.
G Sortie de l'eau de condensation.

condenseurs, dans lesquels on emploie de la vapeur ayant déjà travaillé, dans un ou deux cylindres, à réchauffer l'eau d'alimentation, au lieu de l'envoyer dans le dernier cylindre, où elle n'utiliserait qu'une partie de sa chaleur.

Les réchauffeurs, comme tous les condenseurs, peuvent opérer, soit par surface, soit par mélange. Le modèle Normand, représenté figure 225 est à surface. Les modèles employés en Angleterre et en Amérique travaillent, soit par surface, figure 226, soit par mélange, figure 227.

Les réchauffeurs par surface tendent à prendre l'avance sur les autres. Nous avons indiqué plus haut un des motifs qui militent en leur faveur.

L'expérience a nettement établi l'utilité des réchauffeurs à vapeur au point de vue de l'utilisation. L'économie de charbon réalisée à la suite de leur adoption n'a jamais été de moins de 10 %, quand l'emplacement des appareils est bien choisi. L'origine de cette économie, pour la partie qui se prête au calcul, peut s'établir de la manière suivante.

Considérons le cas extrême, purement théorique quant à présent, d'une machine qui fonctionnerait à 20 kilogrammes de pression et à quadruple expansion dans les conditions suivantes :

	PRESSION	TEMPÉRATURE	CHALEUR totale λ du kilogramme de vapeur
Chaudière.	20^{k},00	211°,3	671 calories.
1er réservoir	8 ,1	169°,9	658 —
2^{e} —	2 ,6	128°,5	646 —
3^{e} —	0 ,6	87°,1	633 —
Condenseur	0 ,1	45°,6	620 —

Supposons l'eau d'alimentation à la température de 20 degrés avant le réchauffage, ce qui exige l'application de 651 calories pour la transformer en vapeur à 20 kilogrammes de pression.

A l'aide de la vapeur d'émission, nous pouvons d'abord réchauffer l'eau à 45°,6 sans faire tomber le vide; la condensation de vapeur pour amener un kilogramme d'eau de 20° à 45°,6, sera :

$$\frac{25,6}{620-25,6}=0^{k},043.$$

On aura ainsi 1^{k},043 d'eau alimentaire, en supposant le réchauffage

fait par injection, ou, s'il a lieu par surface, en supposant que l'on utilise de la même manière l'eau échauffée et l'eau condensée.

L'eau à 45°,6, que l'on fera passer ensuite à 87°,1 en l'échauffant de 41°,5, condensera, par kilogramme :

$$\frac{41°,5}{638 - 87,1} = 0^k,076 .$$

Le kilogramme initial d'eau à 20 degrés sera ainsi transformé en $1^k,043 \times 1,076 = 1^k,132$ d'eau à 87°,1, laquelle, pour passer à 128°,5, consommera par kilogramme,

$$\frac{41,4}{646 - 128,5} = 0,080.$$

Le kilogramme initial d'eau sera ainsi devenu :

$$1,132 \times 1,080 = 1^k,222.$$

De même, après le réchauffage par la vapeur du premier réservoir, le poids de l'eau réchauffée sera devenu :

$$1,222 \times 1,085 = 1^k,330.$$

L'eau étant ainsi chauffée à 169,9, elle n'aura plus à recevoir que :

$$671 - 169,9 = 501,1 \text{ calories,}$$

dans la chaudière, ce qui fait réaliser, comme économie :

$$\frac{651 - 501,1}{651} = 0,23.$$

En regard de cette économie de 23 % sur les calories à donner à l'eau, calculons la perte sur le travail fourni par kilogramme de vapeur. En supposant le travail également réparti entre les quatre cylindres, ce qui est ici une hypothèse suffisamment exacte, le calcul est facile.

Le poids de $1^k,33$ de vapeur produite, est employé à faire du travail et du réchauffage ; il se divise en cinq parties ;

1° $1^k,330 - 1^k,222 = 0^k,108$ fait un quart du travail normal, puis est condensé ;
2° 1 ,222 — 1 ,132 = 0 ,090 fait la moitié du travail normal ;
3° 1 ,132 — 1 ,043 = 0 ,089 fait les trois quarts du travail normal ;
4° . . . . . 0 ,043 fait la totalité du travail normal ;
5° . . . . . 1 ,000 fait la totalité du travail normal.
Total. . . $1^k,330$

La perte de travail, par rapport à ce que rendrait $1^k,33$ de vapeur travaillant dans les quatre cylindres, est :

$$\frac{0,108 \times 0,75 + 0,09 \times 0,5 + 0,089 \times 0,25}{1,33} = 0,11.$$

Le résultat final, comme économie, est donc :

$$0,23 - 0,11 = 0,12.$$

Dans la pratique, il n'a jamais été question d'employer quatre réchauffeurs successifs. On n'utilise pas la chaleur de la vapeur d'émission, à cause des dangers de rentrées d'air au vide, dans un réchauffeur qui serait un deuxième condenseur. On réchauffe une seule fois avec la vapeur d'un des réservoirs.

D'après un calcul analogue aux précédents, on peut obtenir théoriquement une économie de 8 % en réchauffant avec le troisième réservoir, et de 5 % en réchauffant avec le premier. En pratique, on réchauffe de préférence avec la vapeur du premier réservoir ; l'économie réalisée varie selon la position donnée au réchauffeur, qui doit être de préférence dans la chambre de la machine, tout près de sa prise de vapeur.

Les avantages économiques du réchauffage de l'eau tiennent, en partie, à ce que l'eau, introduite chaude, commence à se vaporiser dès son premier contact avec les parois. La circulation se trouve ainsi accrue, et la transmission de la chaleur par convection est favorisée. Ainsi s'explique la valeur élevée de l'économie réalisée avec un seul réchauffage, quand la vapeur est prise au premier réservoir. Le réchauffage donne encore une économie appréciable, bien que moindre que la précédente, quand on prend la vapeur à la chaudière même.

184. — *Appareils de réparation d'eau douce. Bouilleurs à simple effet.* — Les machines marines ne peuvent pas fonctionner, sans certaines pertes d'eau douce, soit continues, par les fuites de tout genre, soit accidentelles, par les extractions, les purges à l'air libre, etc. La quantité d'eau totale contenue dans la chaudière, ou en réserve dans le circuit d'alimentation, irait donc en diminuant constamment, si l'on ne faisait de temps à autre des alimentations supplémentaires, nommées *réparations*.

La *réparation* à l'eau de mer étant aujourd'hui proscrite, il faut avoir, soit un approvisionnement d'eau douce de réserve, soit des appareils de distillation.

Les appareils distillatoires ont été mis à bord depuis longtemps. Ils

servaient autrefois à fournir l'eau douce nécessaire à l'équipage. On a simplement accru leur puissance, pour satisfaire aux besoins nouveaux des machines.

Pour l'eau douce de l'équipage, on a des condensateurs spéciaux. Pour l'eau de la machine, on a le condenseur, qui fait partie de la machine. Nous n'avons à parler que des appareils auxiliaires propres à fournir la vapeur à condenser, qui se nomment *bouilleurs*.

Bouilleur du Crocodile

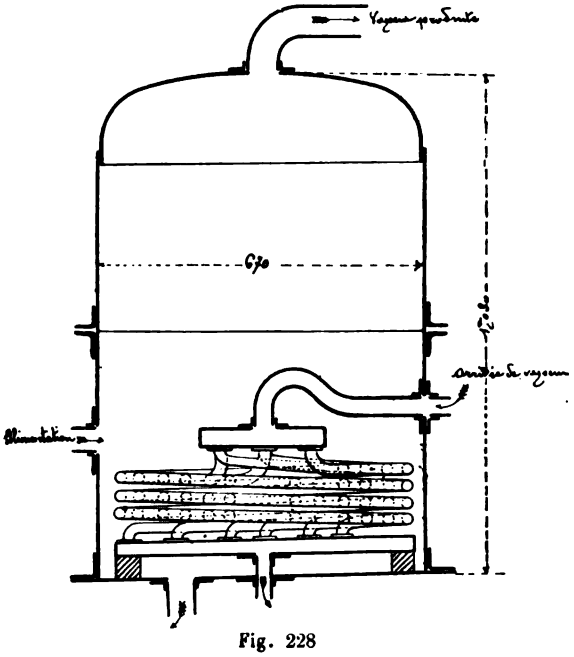


Fig. 228

Bouilleur Cousin

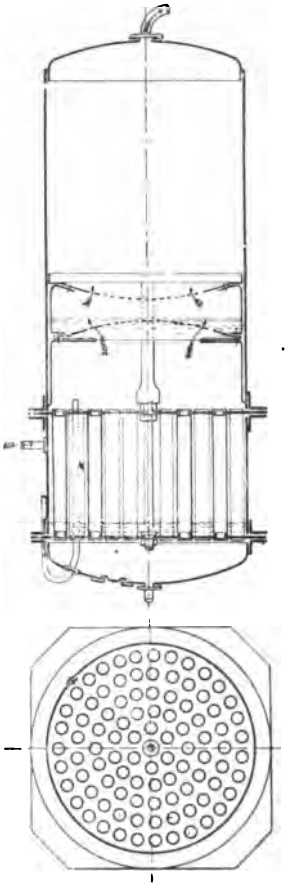


Fig. 229

Pendant très longtemps on a produit la vapeur dans des chaudières chauffées au charbon, alimentées à l'eau de mer, et marchant à basse pression avec extraction. L'impossibilité de loger des chaudières auxiliaires sur les petits bâtiments a fait ensuite employer la vapeur des grandes chaudières comme moyen de chauffage. Les premiers bouilleurs étaient de simples caisses cylindriques, dans lesquelles l'eau de mer était chauffée par un serpentin. On recueillait l'eau condensée dans le serpentin pour la renvoyer aux chaudières, et on condensait la vapeur sortant du bouilleur pour avoir de l'eau potable. La figure 228 représente l'appareil de ce genre, qui a été installé en 1873 sur la canonnière le *Crocodile*.

On a remplacé ensuite le serpentin par un faisceau de tubes, compris entre deux plaques de tête et entouré de vapeur. On a eu ainsi les bouilleurs Cousin, du nom de l'ingénieur qui en avait dessiné le modèle, bouilleurs à simple effet, qui sont encore en service sur beaucoup de bâtiments. Actuellement on est revenu à l'emploi des serpentins, qui ont, sur le faisceau tubulaire, l'avantage de ne pas donner de fuites. On obtient, avec ces appareils, un poids de vapeur inférieur au poids de la vapeur des grandes chaudières qu'ils condensent, 6 kilogrammes environ par kilogramme de charbon brûlé aux chaudières.

185. — *Bouilleurs à effet multiple.* — Dans le bouilleur à simple effet, la chaleur de la vapeur produite est perdue en totalité. On utilise au contraire cette vapeur dans les bouilleurs à effet multiple, appareils beaucoup plus économiques, qui ont été inventés par M. Sochet, dès 1832, au temps des cuisines distillatoires des navires à voiles, et auxquels on est récemment revenu.

Le principe des bouilleurs à effet multiple consiste à placer plusieurs bouilleurs à la suite les uns des autres, chacun d'eux servant de condenseur pour celui qui le précède, et de chaudière pour celui qui le suit. S'il n'y avait pas de pertes de chaleur par refroidissement extérieur, tous les bouilleurs auraient la même production et l'on obtiendrait, avec une quantité de vapeur initiale limitée, une quantité d'eau douce indéfinie. Ce principe n'a rien de paradoxal, puisqu'il n'y aurait pas de perte de chaleur, et qu'il n'y a, d'ailleurs, aucune production de travail.

En raison des refroidissements, la production de vapeur diminue, d'un bouilleur à l'autre, dans un certain rapport q, égal à 0,9 ou 0,8 par exemple. Par conséquent, 1 kilogramme de vapeur initiale produit dans les bouilleurs successifs $q, q^2, q^3, \ldots q^n$ kilogrammes de vapeur ; la quantité d'eau douce obtenue, en sus du premier kilogramme condensé, a donc pour expression :

$$q + q^2 \ldots + q^n = q\,\frac{1 - q^n}{1 - q},$$

dont la limite, pour n infini, serait

$$\frac{q}{1 - q}.$$

M. Sochet composait ses appareils de six bouilleurs, dont un de rechange, dans chacun desquels l'eau condensée était extraite par une petite pompe à air, mue à bras. Actuellement on se contente de trois bouilleurs, et on a ainsi le *bouilleur à triple effet*, actuellement en service, qui est représenté figure 230.

Dans cet appareil, tel qu'il est construit par la maison Mourraille, le bouilleur I recoit directement la vapeur de la chaudière, et réchauffe le bouilleur II, qui réchauffe à son tour III. La température et la pression diminuent naturellement d'un bouilleur à l'autre.

Bouilleur à triple effet (système Mourraille)

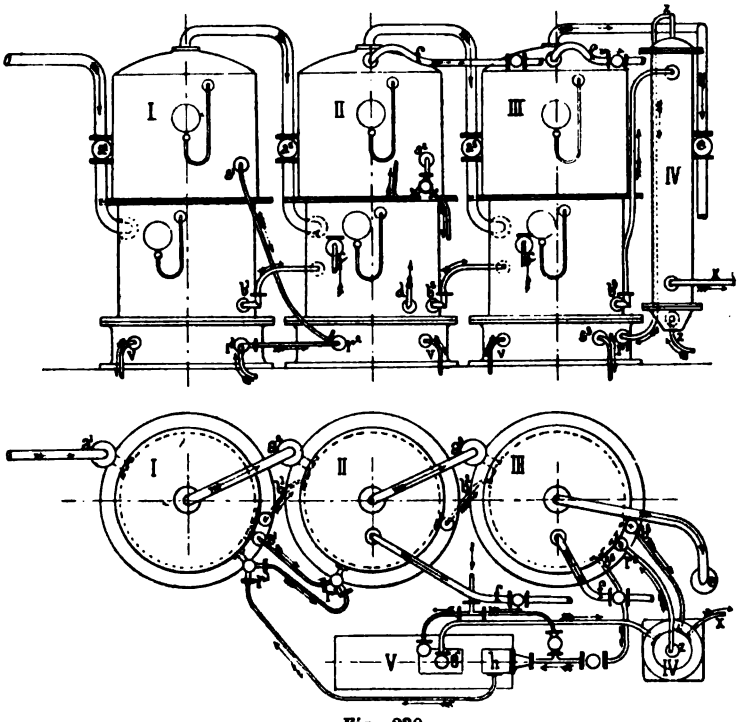


Fig. 230

I Bouilleur à haute pression
II Bouilleur à moyenne pression.
III Bouilleur à basse pression.
IV Réchauffeur d'eau d'alimentation.
V Petit cheval alimentaire.

a^1 Chauffage à la vapeur du bouilleur I
a^2 » » » II
a^3 » » » III
b^1 Sortie d'eau de chauffage du bouilleur I
b^2 » » » II
b^3 » » » III
c Chauffage supplémentaire
d Evacuation accidentelle
e Evacuation au condenseur
f Prise de vapeur à condenser
g Pompe à eau froide
h Pompe à eau chaude
r^1 Alimentation du bouilleur I
r^2 » » II
r^3 » » III
s^1 Extraction du bouilleur I
s^2 « » II
s^3 » » III
v Robinets de vidange
x Sortie d'eau à la bâche
z Entrée et sortie d'eau d'alimentation.

L'eau de mer à vaporiser, ou eau d'alimentation, subit d'abord un réchauffage dans le réservoir IV, qui reçoit l'eau condensée dans le réser-

voir III ; elle se rend de là dans le bouilleur III, où la pression est assez faible pour que l'appel s'y fasse par l'effet de la pression atmosphérique et de la différence de niveau avec la mer. L'eau qui n'a pas été évaporée dans III est prise par une pompe d'alimentation qui la refoule dans le bouilleur I ; ce qui reste après I, passe dans II ; le résidu final, non évaporé dans II, retourne à la mer par une extraction.

L'eau condensée dans I est impropre à tout autre service que celui de réparation ; elle est envoyée en général au condenseur, où elle fait exactement récupérer la dépense de vapeur du bouilleur.

La vapeur produite par les trois bouilleurs, quand elle est destinée à la réparation, est généralement renvoyée aussi au condenseur ; il est préférable de ne pas perdre ainsi sa chaleur et de la diriger vers la machine même, dans le réservoir intermédiaire où sa pression peut lui donner accès ; nous reviendrons sur ce point au numéro suivant.

Bouilleur Mourraille à serpentins

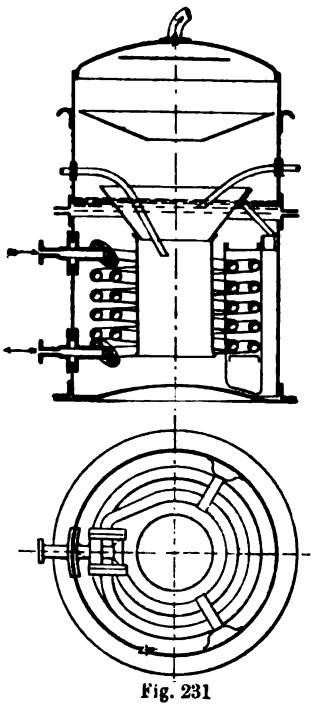


Fig. 231

Les bouilleurs Mourraille sont à tubes ou à serpentins. La disposition intérieure des bouilleurs à serpentins est représentée figure 231 ; elle rappelle beaucoup celle du premier bouilleur construit à Cherbourg par M. Bigot. Le réchauffage est produit par un serpentin, dans lequel la vapeur circule au milieu de la masse liquide à vaporiser ; il n'y a pas de joints ; le nettoyage intérieur se fait facilement, en démontant le fond qui est amovible.

On a construit, sur le même modèle, des bouilleurs à simple effet de diverses grandeurs, qui sont principalement destinés aux torpilleurs. Ces appareils fonctionnent bien. On leur reproche seulement leur poids, qui est élevé. M. Oriolle a construit, exactement sur le même principe, des appareils sensiblement plus légers.

La production d'eau douce, et par suite le rendement économique des bouilleurs à triple effet, sont assez exactement trois fois plus forts que ceux des bouilleurs à simple effet. Des expériences, faites sur le *Jean-Bart* et sur le *Brennus*, ont donné, en effet, une production de 17 litres d'eau douce par kilogramme de charbon brûlé.

Les principales données concernant les bouilleurs Mourraille et quel-

ques autres modèles, ainsi que leur production totale d'eau douce par 24 heures, sont réunies dans le tableau suivant :

			SURFACE de chauffe totale	POIDS de l'appareil eau non comprise	PRODUCTION d'eau par 24 heures
Bouilleurs Mourraille	Bouilleurs tubulaires à triple effet.	grand modèle.	63m²,00	5t,860	6 000 lit.
		moyen modèle.	42 ,00	4 ,230	4 000 »
		petit modèle. .	21 ,00	2 ,700	2 000 »
	Bouilleurs tubulaires à simple effet (modèle Cousin)	grand modèle.	10 ,00	1 ,400	15 000 »
		moyen modèle.	6 ,00	1 ,000	9 000 »
		petit modèle. .	2 ,30	0 ,650	3 500 »
	Bouilleurs à serpentins à simple effet.	grand modèle.	7 ,25	1 ,175	11 000 »
		moyen modèle.	4 ,00	0 ,890	6 000 »
		petit modèle. .	0 ,65	0 ,070	1 000 »
Bouilleur Oriolle à triple effet.			123m²,00	2t,835	60 000 lit.
	Bouilleurs Weir à simple effet.	grand modèle.	10m²,60	»	25 000 lit
		moyen modèle.	7 ,33	»	18 000 »
		petit modèle. .	4 ,64	»	11 000 »

Les variations considérables des surfaces de chauffe et des poids, pour des appareils de même système et de production égale, montrent que l'on est loin d'avoir un modèle général et définitif.

La règle suivie, pour la puissance des bouilleurs délivrés aux bâtiments de guerre français, consiste à assurer une production journalière de 4.000 litres par 1.000 chevaux de puissance maximum, en ayant une réserve de 2.000 litres par 1.000 chevaux. Elle permet de perdre 1/36 de la vapeur sans toucher à la réserve, et de marcher, en consommant la réserve, soit 24 heures en perdant 1/24, soit douze heures en perdant 1/18 de la vapeur, toujours à toute vitesse.

La machine principale, aux mains d'un mécanicien soigneux, ne laisse presque pas fuir de vapeur, parfois même pas du tout; mais, dans toutes les machines auxiliaires et dans les tuyautages éloignés des bouteilles de purge, la perte d'eau douce est, en général, très considérable.

186. — *Bouilleurs à combinaison, produisant à la fois de l'eau douce et du travail.*

La question des bouilleurs a plus d'intérêt que ne l'indique la considération des pertes d'eau douce de la machine, si exagérées qu'on les suppose, et celle de la consommation de l'équipage. La vapeur employée en jets, peut rendre, en effet, des services importants, qu'on ne lui demande pas en général. On est arrêté, en grande partie, par le prix auquel revient, en charbon dépensé, la réparation d'eau douce, ainsi que nous l'avons vu aux numéros 36 et 37 pour le tirage forcé, au numéro 59 pour la pulvérisation du pétrole.

Nous avons admis, selon l'usage, aux numéros 36 et 59, que la nécessité de réparer multiplie par deux la dépense de charbon due à l'emploi des jets de vapeur. Ce chiffre est trop faible, avec les bouilleurs à simple effet, qui se rencontrent le plus souvent sur les navires actuels ; en réalité, la dépense est multipliée par 2,5, le charbon dépensé à la consommation ne rendant, en vapeur, que les deux tiers de ce qu'il vaporiserait directement dans la chaudière.

Avec le bouilleur à triple effet, la dépense est multipliée par 1,5 seulement, le rendement des bouilleurs étant triplé; ce chiffre est encore élevé. De plus, pour une production temporaire de vapeur atteignant le chiffre de ce que peut consommer le tirage forcé ou induit, par exemple, le poids des bouilleurs actuels à triple effet deviendrait excessif.

Il y aurait donc grand intérêt à accroître encore le rendement actuel, et à pouvoir faire varier la puissance de production, en restant dans des limites de poids acceptables.

M. Gayde, qui, pendant un embarquement en escadre, a fait une étude approfondie des pertes d'eau douce et des moyens de les diminuer, a préconisé une disposition de bouilleurs propre à réduire le prix de production de l'eau douce.

Le principe de la méthode serait de faire agir la vapeur dans un bouilleur à simple effet, sans la refroidir jusqu'à condensation, et de demander à la vapeur produite, de faire du travail dans la machine, au lieu d'une nouvelle vaporisation d'eau. La vapeur partiellement refroidie et la vapeur nouvelle, obtenue sensiblement à la même pression, retourneraient ensemble à la machine, dans un réservoir de cylindre à pression correspondante à la leur ; du choix du réservoir d'évacuation des bouilleurs, dépendrait leur puissance évaporatoire par mètre carré de surface de chauffe. On peut, du reste, utiliser d'une manière différente les deux vapeurs sortant du bouilleur, et faire avec elles toutes les combinaisons imaginables. La perte totale de chaleur pourrait ainsi se réduire théoriquement à zéro, ou plutôt à la perte par rayonnement et conductibilité

du bouilleur et de son tuyautage. On pourrait entretenir pleines les caisses de réserve, en profitant des circonstances habituelles de marche, où les besoins de la réparation sont faibles. Le bouilleur se disposerait sans difficulté d'ailleurs, pour fonctionner au besoin comme un bouilleur à grande production, en vue des circonstances exceptionnelles, où une grande production d'eau douce serait immédiatement nécessaire.

Cette combinaison d'une production de vapeur et d'une production de travail mérite d'être essayée. Déjà, M. Weir fait une application partielle du principe, en employant à chauffer son bouilleur, de la vapeur ayant fourni du travail ou de la chaleur dans la machine.

CHAPITRE XIX

ACCESSOIRES RELATIFS AU SERVICE DES ESCARBILLES

187. — *Mouvement du charbon et des escarbilles.* — Il n'y a pas d'accessoires relatifs au service du charbon, méritant d'être mentionnés. Un matériel de chariots de transport et d'outils spéciaux a été autrefois créé pour la chauffe méthodique ; il a été de bonne heure abandonné et n'a pas été repris. L'emploi des briquettes a du reste facilité beaucoup les mouvements de charbon, soit à l'intérieur des soutes, soit même dans les chambres de chauffe.

L'enlèvement des escarbilles est au contraire une manœuvre importante, pour laquelle on ne se contente plus de l'ancien treuil à bras ou à vapeur, incommode et bruyant.

188. — *Escarbilleur de Maupeou.* — Cet appareil a été spécialement inventé à l'occasion du tirage forcé en vase clos, qui rend plus difficile l'enlèvement des seaux d'escarbilles, en obligeant à placer des clapets de retenue d'air sur leur parcours.

Le principe consiste à broyer les escarbilles, à les mélanger ensuite avec de l'eau et à rejeter à la mer la bouillie ainsi formée, à l'aide d'une pompe foulante.

Modifié à diverses reprises, l'escarbilleur se compose, dans sa forme actuelle, de deux mâchoires, l'une fixe, l'autre oscillante, entre lesquelles passent les escarbilles à écraser. La mâchoire fixe appuyée sur un fort ressort, cède légèrement quand un morceau de fer vient à passer, mêlé aux escarbilles. Les avaries sont ainsi évitées, et le fonctionnement régulier de l'appareil est assuré.

D'après une expérience faite à Cherbourg en 1887, l'escarbilleur De

Maupeou, refoulant à $5^{m},20$ de hauteur, expulse par seconde, un poids d'escarbilles de $0^{k},338$. Le travail moteur sur les pistons, tant pour le broyage que pour le pompage, est de 299 kilogrammètres. Le rendement mécanique est donc égal à 0,0067. Ce chiffre peut sembler faible, mais, en pareille matière, la question de bon fonctionnement prime celle de rendement.

Pompe à escarbilles

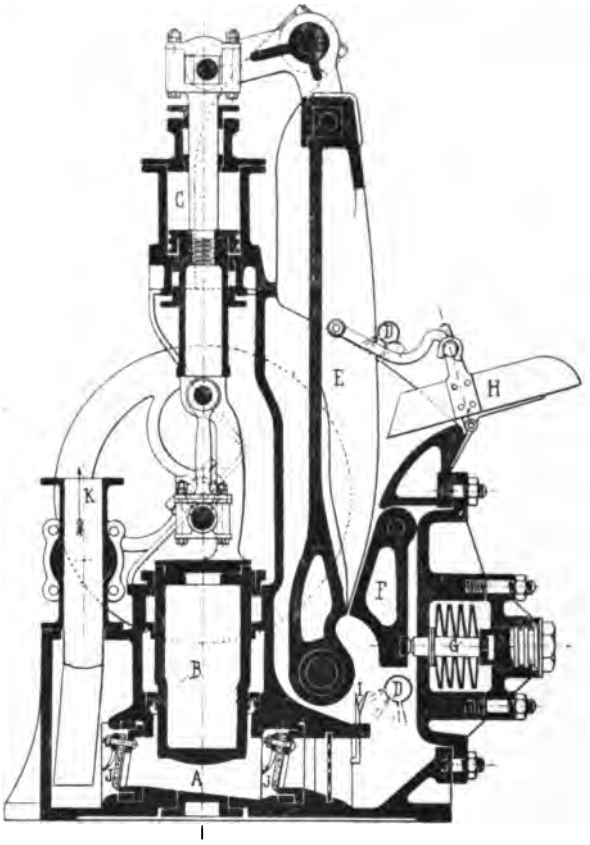


Fig. 232

A Corps de pompe.
B Piston à escarbilles.
C Cylindre à vapeur.
D Tuyau d'arrivée d'eau.
E Mâchoire mobile.
F Mâchoire fixe soutenue par les ressorts G.
H Tablier oscillant recevant les escarbilles.
I Peigne pour retenir les étoupes.
J Clapets en caoutchouc.
K Tuyau de refoulement des escarbilles.

189. — *Ejecteur d'escarbilles à eau.* — On peut rejeter à la mer toutes les escarbilles avec le mâchefer, sans aucun broyage, à l'aide d'éjecteurs à eau, dont il existe plusieurs modèles.

Dans un éjecteur en service sur les *ferry-boats* américains, on fait

un mélange préalable d'eau et d'escarbilles dans un longue caisse, alimentée par un robinet d'eau de mer. Le tuyau éjecteur, qui puise le mélange dans le bas de la caisse, reçoit, suivant son axe, un jet d'eau comprimée, lancé par une des pompes du bord.

Dans l'éjecteur See ou Trewent (fig. 233), essayé en 1896 à Cherbourg, les escarbilles sèches sont versées directement dans le tuyau éjecteur par une trémie. Le jet d'eau comprimée à la pression de 12 à 18 kilogrammes est lancé par un ajutage; de petits clapets permettent l'entrée de l'air atmosphérique dans le tuyau éjecteur au-dessus de l'ajutage.

Ejecteur See

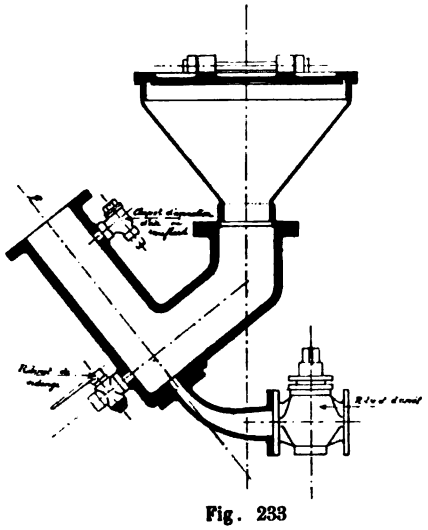


Fig. 233

Avec un refoulement de 5m,50 de hauteur, l'appareil essayé a débité 2k,909 d'escarbilles par seconde, en dépensant 505,25 kilogrammètres sur les pistons. Le rendement mécanique est donc égal à 0,0311.

Le débit moyen par heure, pour des hauteurs de refoulement de 5m,50, de 6m,95 et de 8m,40 a été trouvé de 10 tonnes, de 8t,5 et de 5 tonnes à l'heure, les pressions d'eau nécessaires étant respectivement 12 kilogrammes, 14k,5 et 17 kilogrammes. Les seuls incidents ont été quelques désamorçages, qui paraissent faciles à éviter.

L'éjecteur See a, sur l'escarbilleur-broyeur, outre l'avantage d'un rendement quatre fois supérieur, ceux d'une plus grande simplicité de construction et de fonctionnement. Son débit est considérable et permet d'opérer très rapidement. Il rend de bons services sur les paquebots de la Compagnie transatlantique, et il va être essayé sur le *Bouvet* et le *Duchayla*.

Un éjecteur d'escarbilles à vapeur a fonctionné quelques temps, en 1867, à bord du *Corse*; il marchait bien, mais son rendement était extrêmement faible. La nécessité d'économiser l'eau douce ne permet plus aujourd'hui de songer aux éjecteurs à vapeur.

APPENDICE AU CHAPITRE VI

RENDEMENT ÉCONOMIQUE DES CHAUDIÈRES DE LOCOMOTIVES

190. — *Expériences de M. Henry sur l'influence de la longueur des tubes.* — Les chaudières dites locomotives, décrites au chapitre IX, n'ont fait dans la Marine qu'une simple apparition, sur des bâtiments d'une destination spéciale, pour lesquels on peut aujourd'hui les regarder comme abandonnées.

Sur les chemins de fer, les véritables chaudières de locomotives, à tubes longs et à grilles abaissées, font un service satisfaisant, qui s'améliore encore chaque jour. Nous n'avons pas à les considérer ici au point de vue de la sécurité, de l'entretien ou de la durée, les conditions de fonctionnement étant trop différentes, dans les navires et à la tête des trains. Il est très instructif, au contraire, d'étudier leur rendement économique, tant sous le rapport de la combustion que sous celui de l'utilisation de la chaleur produite ; le rendement dépend en effet des mêmes considérations sur toutes les chaudières, et les moyens de l'améliorer sont toujours analogues.

L'étude expérimentale de la vaporisation dans les chaudières de locomotives a été faite avec beaucoup de soin et de méthode, à la Compagnie P.-L.-M., par M. Henry, ingénieur en chef de la traction ; il sera commode de prendre ses résultats pour les rapprocher de ceux donnés pour les chaudières marines, dans le cours du chapitre VI.

M. Henry a pris comme variables, dans ses expériences, la longueur des tubes et l'intensité du tirage. Sa chaudière, de même que la chaudière d'essai de M. Geoffroy citée au numéro 69, se composait d'un foyer suivi de viroles démontables ; elle pouvait ainsi recevoir des tubes de neuf longueurs allant de 2 mètres à 7 mètres. Les tirages employés étaient de 25, de 45, et de 75 millimètres d'eau.

La surface de grilles G était de $2^{m²},5$ environ, sa projection horizontale étant de $2^{m²},24$. La surface de chauffe du foyer était de $10^{m²},12$; la surface de chauffe intérieure des tubes variait de $53^{m²},47$ à $187^{m²},15$, ce qui donne, pour le rapport de S à G, des valeurs allant de 25 à 79. Les autres données étaient :

Nombre de tubes	185.
Diamètre extérieur des tubes.	$46 + 2 \times 2 = 50$ millimètres.
Section totale intérieure des tubes.	$0^{m²},30747$.
— — bagues.	$0^{m²},18833$.

Comme détail des expériences, l'épaisseur de la couche de charbon est indiquée comme ayant varié avec l'intensité du tirage, afin de donner toujours le meilleur rendement possible; elle paraît être restée généralement voisine de 25 centimètres. Le signal des chargements de charbon était donné par un thermomètre actionnant une sonnerie électrique, quand la température baissait dans la boîte à fumée.

Le tirage, produit par un jet de vapeur, était mesuré par la dépression entre la boîte à fumée et le cendrier. La dépense de vapeur du jet n'a pas été indiquée.

La fumée était analysée à l'appareil Orsat.

Les principaux résultats, au point de vue des comparaisons à établir, sont résumés dans le tableau suivant.

		3 m.	4 m.	5 m.	6 m.	7 m.
Longueur des tubes						
Surface de chauffe totale S		$90^{m²},33$	$117^{m²},06$	$143^{m²},80$	$170^{m²},53$	$197^{m²},27$
Rapport $\frac{S}{G}$		36 ,13	46 ,82	57 ,52	68 ,21	78 ,91
Combustion par mètre carré de grilles aux tirages de	25 mm.	$18^{k},4$	$17^{k},6$	$16^{k},6$	$14^{k},0$	$14^{k},2$
	45 —	260 0	246 ,0	226 ,0	210 ,0	201 ,6
	75 —	345 ,2	326 ,8	300 ,8	278 ,8	267 ,2
Eau vaporisée par kilog. de charbon aux tirages de	25 mm.	$7^{k},87$	$9^{k},01$	$9^{k},65$	$9^{k},94$	$10^{k},20$
	45 —	7 ,55	8 ,66	9 ,29	9 ,58	9 ,84
	75 —	7 ,11	8 ,22	8 ,85	9 ,14	9 ,40
Rendement économique total, aux tirages de	25 mm.	0,667	0,728	0,800	0,840	0,830
	45 —	0,631	0.697	0,772	0,802	0,800
	75 —	0,579	0,653	»	0,730	0,752
Température des gaz dans la boîte à fumée, aux tirages de	25 mm.	393°	320°	270°	238°	222°
	45 —	434	352	294	260	236
	75 —	480	384	317	279	252
Perte de chaleur par la cheminée, aux tirages de	25 mm.	0,174	0,137	0,114	0,102	0,097
	45 —	0,190	0,147	0,123	0,110	0,103
	75 —	0,212	0,159	0,131	0,117	0,109

Le rendement économique total, ainsi que la perte par la cheminée, ont été calculés par rapport à la production de chaleur du charbon dans

la combustion parfaite, laquelle était de 7.880 calories par kilogramme. On brûlait des briquettes de Mariemont, d'une composition assez analogue à celle des briquettes d'Anzin.

Le rendement économique a atteint des valeurs remarquablement fortes, la production de $10^{k},20$ de vapeur à haute pression, sans correction de températures, est un résultat rarement obtenu. Après l'addition d'un Tenbrinck dans le foyer, on a même atteint une vaporisation de $10^{k},43$ et un rendement économique de 0,855. Ces chiffres sont à retenir pour savoir jusqu'où l'on doit viser dans les nouvelles chaudières tubuleuses de la marine. Bien qu'avec les tubes courts, le rendement n'ait guère dépassé les chiffres usuels, il faut admettre que les très grandes valeurs obtenues avec les tubes longs ne sont pas uniquement dues à la surface de chauffe ; il faut tenir compte aussi de la faible importance des pertes par la cheminée, provenant de ce que la dépense d'air pour la combustion est constamment restée au-dessous de 11 mètres cubes par kilogramme de charbon.

Dans les expériences faites à divers tirages, la dépense d'air par kilogramme de charbon diminuait, selon la règle générale, à mesure que le tirage était plus intense ; cette dépense a été en moyenne de $10^{m3},1$, de $9^{m3},5$ et de $8^{m3},9$ aux trois tirages employés. La variation est, comme on voit, bien moins prononcée qu'elle ne l'est aux faibles tirages, dans les expériences sur des chaudières marines rapportées au n° 66 ; une raison importante pouvant expliquer des différences sensibles, même à tirage égal, entre les conditions de la combustion des appareils, se trouverait dans l'épaisseur beaucoup plus forte donnée à la couche de charbon, à tous les tirages, sur la grille de la locomotive.

191. — *Influence de la disposition du foyer.* — A la suite des expériences faites avec le foyer ordinaire, M. Henry en a exécuté trois autres séries, après avoir établi au-dessus de la grille, et à peu près parallèlement à celle-ci, des écrans qui ramenaient la flamme vers l'avant, et la forçaient à se brasser avant l'arrivée aux tubes, à peu près comme fait la flamme sur la grille du *Forban*. Les deux premiers écrans étaient des voûtes en maçonnerie, de longueurs différentes, établies à $0^{m},75$ environ au-dessus de la grille ; le troisième était un Tenbrinck placé à $0^{m},625$ environ de la grille.

Ces nouvelles expériences ont été faites comme les premières, et en adoptant successivement toutes les mêmes longueurs de tubes. En prenant la moyenne des expériences avec tous les tubes, comme cela est permis pour des résultats sensiblement indépendants de la longueur des tubes, on forme le tableau suivant, qui rend compte de l'influence du brassage de la flamme sur le rendement de la combustion en calories.

		FOYER ordinaire	VOUTE courte	VOUTE longue	Tenbrinck
Proportion d'oxyde de carbone $\frac{CO}{CO^2 + CO}$ aux trois tirages de. . . .	25 m/m.	0,099	0,078	0,070	0,083
	45 »	0,114	0,079	0,081	0,069
	75 »	0,144	0,086	0,085	0,078
Proportion d'escarbilles, cendrier et cheminée, aux trois tirages de. . . .	25 m/m.	0,0145	0,0074	0,0065	0,0088
	45 »	0,0266	0,0148	0,0141	0,0150
	75 »	0,0477	0,0285	0,0222	0,0313
Rendement de combustion en calories, aux trois tirages de. . . .	25 m/m.	0,92	0,95	0,95	0,95
	45 »	0,91	0,94	0,94	0,94
	75 »	0,90	0,93	0,94	0,93

Ces résultats confirment bien ce que la pratique courante a révélé, au sujet de la nécessité du brassage pour brûler l'oxyde de carbone, surtout avec des tirages forcés énergiques. Il est à remarquer que le Tenbrinck, malgré la température plus basse de sa paroi, n'a pas été moins efficace que la voûte en maçonnerie pour faire obtenir une combustion complète. L'amélioration de 3 % en moyenne, obtenue pour le rendement de la combustion, ne saurait représenter, tant s'en faut, ce que fait réaliser la disposition des chaudières à retour de flamme, par rapport aux chaudières à flamme directe.

Les expériences de M. Henry ont conduit à des applications immédiates pour la construction des chaudières de locomotives, qui ont largement payé leur dépense. Pour les chaudières marines, elles méritent d'être consultées à titre de comparaison ; elles montrent ce que l'on doit obtenir avec des surfaces de chauffe bien proportionnées et bien disposées, et avec des foyers capables de donner une combustion parfaite à toutes les intensités de tirage. Elles constituent enfin un modèle à imiter pour les études nécessaires sur des chaudières des autres systèmes.

ERRATA

Page 46, ligne 16, après les mots « quelques cargos » ajouter « quelques canonnières ».

Page 56, ligne 14, au lieu de « détenteurs », lire « détendeurs ».

Page 94, ligne 4, au lieu de « surchauffeur », lire « réchauffeur ».

Page 128, ligne 14, au lieu de « installation des feux », lire « inspection des feux ».

Pages 150-152, en ce qui concerne le feutrage, les isolants d'amiante et de coton siliceux sont maintenant adoptés exclusivement, pour toutes les chaudières à haute pression, soit tubulaires, soit tubuleuses.

Page 154, n° 76. L'emploi du carbonate de soude pour neutraliser les acides gras est antérieur aux études de MM. Hétet et Risbec, qui ont préconisé, au contraire, l'usage de l'eau de chaux. M. Risbec a construit à cette occasion l'appareil d'injection cité au n° 179.

Page 189, ligne 9, lire fig. 81, 82, 83.

Page 195, ligne 5, ajouter « la disposition de la figure 91 est seule à recommander ».

Page 250, ligne 29, au lieu de « n° 158 », lire « n° 160 ».

Page 254, ligne 2, au lieu de « n° 121 », lire n° 122 ».

Page 289, ligne 17, au lieu de « balles », lire « bulles ».

Page 332, ligne 32, au lieu de « n° 145 » lire « n° 154 ».

Page 347, au lieu de « Tornycroft », lire « Thornycroft ».

Page 367, sur la figure, le capot en place doit être divisé en deux parties par un trait plein dans l'axe de la figure.

Page 378, au bas de la page, supprimer les mots « mais son emploi tend à se généraliser ».

LISTE DES FIGURES

Numéros des figures		Pages
1	Courbes pour la détermination de la vitesse économique . .	15
2	Courbes des coefficients d'utilisation M et M_1 en fonction de la vitesse.	21
3	Courbes des consommations de charbon et des distances franchissables, en fonction de la vitesse	22
4, 4 *bis*, 4 *ter*	Ancienne chaudière rectangulaire à carneaux 26	et 27
5, 5 *bis*	Chaudière rectangulaire tubulaire, modèle 1858	29
6, 6 *bis*	Chaudière rectangulaire à tubes bouilleurs système Martin-Cochrane	30
7, 7 *bis*	Chaudière cylindrique, modèle réglementaire de 1876. . .	32
8, 8 *bis*	Chaudière du *Jean-Bart*.	33
9, 9 *bis*	Chaudière du *Cécille*	34
10, 10 *bis*	Chaudière du d'*Entrecasteaux*.	35
11, 11 *bis*	Chaudière du *Marceau*	36
12, 12 *bis*	Chaudière locomotive type B, pour torpilleurs.	37
13, 13 *bis*	Chaudière de la *Flamme*	38
14, 14 *bis*	Chaudière du *Milan*.	39
15, 15 *bis*	Chaudière du *Jauréguiberry*	40
16, 16 *bis*	Chaudière des torpilleurs 172 à 176.	41
17	Machine du *Carnot*.	47
18	Machine de l'*Hirondelle*.	48
19	Machine du *Milan*	49
20	Machine du *Redoutable*	50
21	Machine de l'*Intrépide*.	51
22	Grilles de la Marine militaire.	69
23, 23 *bis*	Grilles de l'Amirauté anglaise	69
24	Grilles américaines à cannelure	69
25, 25 *bis*	Ancienne grille Belleville	70
26, 26 *bis*	Supports de grilles.	71
27, 27 *bis*	Appareil Bourdon-Thierry	78
28	Soufflerie Niclausse	80
29	Injecteur d'air comprimé	83
30	Tirage forcé en cendrier clos, système Audenet . . .	91
31	Réchauffeur Kemp pour l'eau d'alimentation	96
32	Réchauffeur Howden pour l'air de la combustion	99
33, 33 *bis*	Réchauffeur Ellis et Eaves pour l'air de la combustion . .	101
34, 34 *bis*, 34 *ter*	Outils de chauffe.	104
35	Ramoneur D'Allest	107
36	Grille à augets pour le pétrole, modèle Gustave Zédé. . .	116
37	— — — Nobel	116
38, 38 *bis*	Augets à mèche modèle Ferrari	117

Nos des figures		Pages
39	Brûleur Leblond et Caville pour la vapeur de pétrole. . .	117
40, 40 *bis*	Brûleur Symon-House — — . . .	118
41	Pulvérisateur Kauffmann	120
42	Pulvérisateur Anderson.	120
43	Pulvérisateur Urquhart.	120
44	Pulvérisateur Cuniberti.	120
45, 45 *bis*	Pulvérisateur Guyot.	120
46	Disposition vicieuse d'un pulvérisateur	121
47	Foyer Urquhart	121
48	Foyer de chaudière locomotive chauffée au pétrole. . . .	122
49	Foyer de chaudière cylindrique do	122
50, 50 *bis*, *ter* et *quater*	Chaudière Guyot chauffée au pétrole	124 et 125
51	Ecran isolateur pour conduit de fumée	151
52, 52 *bis*	Chaudière de la *Drôme*.	162
53, 53 *bis*	Chaudière du *Germanic*	164
54, 54 *bis*	Chaudière du *Columbia*.	166
55, 55 *bis*	Chaudière du *Linois*.	167
56	Bouilleurs Galloway du *Fleurus*	169
57	— — de la *Surprise*	169
58	Déformation d'un foyer cylindrique	171
59	Foyer en viroles.	172
60	Détail de l'assemblage des viroles.	172
61	Disposition des coutures de foyers	172
62	Foyer ondulé modèle Fox	173
63	Foyers du *Wattignies* après affaissement	hors texte
64	Foyer ondulé modèle Purves	174
65, 65 *bis*	Armatures circulaires pour foyers	174
66, 66 *bis*	Assemblage des foyers et des boîtes à feu	175
67, 67 *bis* 67 *ter*	Assemblage des foyers et des façades.	176
68	Entretoise creuse.	177
69	Défaut de tenue des entretoises, sur simple taraudage . .	178
70	Ciel de boîte à feu à viroles	178
71	Ciel de boîte à feu à soufflet	179
72, 72 *bis*	Fermes pour armaturage de boîtes à feu.	180
73, 73 *bis*	Fermes suspendues à des tirants	181
74	Tube à ailettes, système Serve.	183
75	Disposition de tubes en quinconce.	185
75 *bis*	— — rectangulaire	185
76	Tube rivé et bagué.	186
77	Tube mandriné à l'appareil Dudgeon.	187
78	Tube mandriné à l'appareil Caraman	187
79	Tube à rivure arrasée	189
80	Tube à pavillon saillant	189
81	Ferrule de Chatham.	189
82	Joint des tubes du *Fleurus*.	189
83	Variante du modèle précédent.	189
84	Tampon double à serrage conique	191
85	Même tampon, avec bagues en cuivre système Gérard. . .	191
86	Tampon double à serrage plan, modèle de Toulon . . .	191
87, 87 *bis*	Tampon à presse-étoupes, modèle Houille	191
88, 88 *bis* 88 *ter*	Tampon articulé, modèle Latil.	192

Nos des figures		Pages
89	Boîte à fumée, avec cloisons et registres	193
90	Couture longitudinale à trois rangs de rivets	195
91	— — à deux rangs de rivets	195
92	Rencontre de deux coutures ; première disposition	196
93	— deuxième disposition	196
94	— troisième disposition	196
94 *bis*	Détail de couvre-joint	196
95	Assemblage de l'enveloppe et d'un fond de chaudière	197
96	Disposition pour permettre le rivetage hydraulique	198
97	Détail de rivetage hydraulique	198
98	Fatigue dans les joints de l'enveloppe	201
99	Déformation de l'enveloppe et des fonds	203
100	Autre genre de déformation	203
101	Effet des inégalités de dilatation	205
102	Déformation permanente d'une tôle inégalement chauffée	206
103	Capitonnage d'une tôle entretoisée	206
104	Chaudière du torpilleur 60	210
105	Chaudière du *Chisima*	212
106	Chaudière du *Faucon*	213
107	Chaudière demi-cylindrique à retour de flamme	214
108	Chaudière Belleville de la *Biche*	237
109	Chaudière de l'*Argus*	238
110, 110 *bis*	Chaudière modèle 1866 pour canot	239
111	— modèle 1895 —	239
112	Chaudière de l'*Hirondelle*, modèle 1869	240
113	Détail du tube diviseur	240
114	Chaudière de l'*Hirondelle*, modèle 1872	241
115	Chaudière du *Charlemagne*	244
116	Séparateur Belleville ; premier modèle	245
117, 117 *bis*	— — deuxième modèle	246
118	Nouvelle chaudière Belleville avec réchauffeur d'alimentation	247
119	Boîte de raccord et joint sur le collecteur d'alimentation	248
120	Chaudière Joessel du *Piston*	254
121, 121 *bis*	Chaudière Oriolle	256
122, 123, 124	Chaudière Barret-Lagrafel ; brevets successifs	259
125, 125 *bis*	Chaudière Lagrafel-D'Allest du *Guichen*	260
126	Boîte à feu D'Allest de la *Bombe*	262
127	— du d'*Iberville*	262
128, 129	Garnitures de trous d'homme pour chaudières D'Allest	263
130	Intumescence dans le collecteur supérieur	263
131	Usure d'un tube D'Allest à son emmanchement	266
132, 132 *bis* 132 *ter*	Chaudière Seaton à circulation Joessel-D'Allest	267
133, 133 *bis*	Chaudière Babcock et Wilcox	268
134	Chaudière Anderson et Lyall	269
135	Chaudière Towne	270
136	Chaudière Petit et Godard	271
137	Chaudière cylindrique Leblond et Caville, à circulation Petit-Godard	272
138	Chaudière Field	273
139	Circulation dans les tubes de la chaudière Field	273
140	Circulation dans les tubes de la chaudière Collet	273
141, 141 *bis*	Chaudière Niclausse	274-275
142	Lanternes des tubes Niclausse	276

N°s des figures		Pages
143, 143 *bis*		
143 *ter*	Chaudière Dürr	280
144	Chaudière De Dion-Bouton-Trépardoux	281
145	Chaudière Ward	282
146	Chaudière Charles et Babillot	284
147	Circulation produite par l'échauffement dans une branche d'un siphon renversé	288
148	Effet du dégagement de bulles dans un vase	291
148 *bis*	— — dans une branche d'un siphon	291
149	Dégagement de bulles produisant la circulation des chaudières Du Temple	291
150	Dégagement de bulles produisant la circulation des chaudières Sochet et Thornycroft	292
151	Dégagement de bulles dans une branche d'un siphon renversé	292
152	Cas des bulles de diamètre supérieur au diamètre du siphon	293
153, 153 *bis*	Chaudière Sochet	294
154	Chaudière Du Temple du *Dragon*	297
155	Chaudière du *Chevalier*	299
156, 156 *bis*	Chaudière du *Mangini*	300
157, 157 *bis*	Chaudière des torpilleurs 206-211, modèle Du Temple-Guyot	302
158	Emmanchement de tubes Du Temple	303
159, 159 *bis*	Chaudière du torpilleur 186, modèle Du Temple-Normand	304
160	Trajet de la flamme dans la chaudière du *Forban*	305
160 *bis*	— — — de l'*Aquilon*	305
161, 161 *bis*	Chaudière du *Forban*, modèle Normand	306
162	Chaudière double Normand-Sigaudy à flamme directe	309
162 *bis*	— — — à flamme en retour	309
163	Chaudière de la *Jeanne-d'Arc*	311
164	Chaudière Leblond et Caville, à circulation Du Temple	312
165, 165 *bis*	Chaudière D'Allest, à circulation Du Temple	313
166	Chaudière du *Véloce*, modèle Thornycroft	314
167	— *During* —	317
168	Chaudière Mosher	319
169	Chaudière Symon-House	320
170	Emmanchement de tubes Symon-House	320
171	Chaudière Yarrow	321
172	Chaudière Blechynden	324
173	Chaudière Reed	325
174	Emmanchement de tubes Reed	325
175	Chaudière Samuel White	326
176	Chaudière Fleming et Fergusson	327
177	Chaudière Seaton, à circulation Du Temple	329
178	Tampon de tubes Girard, pour chaudière Oriolle ou D'Allest	340
179	Ecrou borgne modèle Portay, pour tubes Du Temple	340
180	Tampon conique à écrou	340
181	Bouchon autoclave, ancien modèle	363
182	— — nouveau modèle	363
183	Porte de foyer à fermeture automatique	364
184	— — modèle des torpilleurs	364
185	Porte de cendrier à fermeture automatique	365
186	Fermeture d'enveloppe de cheminée des torpilleurs	366
187	Fermeture d'enveloppe à volets du *Sfax*	366
188	Cheminée du *Friant*, en deux parties, à joint glissant	366
189	Capot de cheminée du *Charles-Martel*	367

Nos des figures		Pages
190	Soupape de sûreté des chaudières du *Bouvet*.	370
191	Soupape de sûreté à grande levée, modèle d'Indret . . .	374
192, 193	— — — autres modèles . . .	374
194	Soupape d'arrêt	375
195	Robinet-vanne Ciron.	376
196	— Muller	376
197	Détendeur Belleville.	377
198	Tuyau de vapeur à soufflet.	379
199	Tuyau de vapeur à joint glissant	379
200	Epurateur de vapeur.	381
201	Purgeur automatique de l'épurateur Belleville.	382
202	Surchauffeur de vapeur Dupuy de Lome.	383
203	Surchauffeur Lafond.	384
204	Surchauffeur de vapeur système Ludwig et Weber . . .	385
205	Tube de niveau, modèle d'Indret	388
206	Tube de niveau à enveloppe, modèle Louppe	388
207	Tube de niveau avec fermeture automatique à billes . . .	388
208	Régulateur d'alimentation à main, modèle d'Indret . . .	390
209	Régulateur automatique Belleville.	392
210	— — Thornycroft.	392
211, 211 *bis*	Régulateur automatique à robinet.	393
211 *ter*	Régulateur automatique à tiroir	393
212	Régulateur Messier, à diaphragme	394
213	Trompe flottante du *Haleur*	395
214	Hydrokineter.	396
215, 216	Brassage par l'eau d'alimentation.	397
217	Détail de l'injecteur pour brassage	397
218	Barboteuse Garnier	398
219	Appareil Risbec pour injection d'eaux de chaux	399
220	Disposition des plaques de zinc dans les chaudières . . .	400
221	Filtre à éponges de M. Normand.	401
222	Tuyautage d'alimentation desservant le filtre	401
223, 224	Purificateurs de vapeur.	402
225	Réchauffeur d'alimentation de la *Surprise*	403
226	Réchauffeur Wainwright	403
227	Réchauffeur Weir	403
228	Bouilleur du *Crocodile*	407
229	Bouilleur Cousin.	407
230	Bouilleur Mourraille à triple effet.	409
231	— à serpentins.	410
232	Escarbilleur De Maupeou	416
233	Ejecteur d'escarbilles à eau.	417

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION

Lois principales de la navigation à vapeur et disposition générale des chaudières et des machines marines.

CHAPITRE PREMIER

Lois principales de la navigation à vapeur.

Nos		Pages
	Notations employées dans ce chapitre	3
1.	Adoption des moteurs à vapeur dans la marine.	4
	§ 1. — *De la vitesse.*	
2.	Vitesse des navires à vapeur	4
3.	Coefficient d'utilisation; ses deux formes	6
	§ 2. — *De la distance franchissable.*	
4.	Calcul de la distance franchissable.	10
5.	Coefficient de distance franchissable.	12
6.	Consommation de charbon des services auxiliaires	13
7.	Vitesse économique. Distance franchissable réelle. Action de la voilure	14
8.	Courbes et tableaux des puissances, des consommations, etc. . .	18
	§ 3. — *Régularité du service.*	
9.	Effet du tangage sur la vitesse.	20

CHAPITRE II

Description sommaire des chaudières.

10.	Considérations générales.	25
	§ 1. — *Classification des chaudières.*	
11.	Chaudières à carneaux.	28
12.	Chaudières tubulaires. — Modèle rectangulaire.	30
13.	Chaudières cylindriques	31
14.	Chaudières locomotives	37
15.	Chaudières tubuleuses.	38
	§ 2. — *Indications sur le fonctionnement des chaudières.*	
16.	Des accessoires de chaudières, services principaux à assurer . .	42

CHAPITRE III

Description sommaire des machines marines.

§ 1. — *Indications générales.*

Nos		Pages
17.	Du fonctionnement des machines marines.	45

§ 2 . — *Classification des machines.*

18.	Machines verticales. Modèle à pilon.	47
19.	Machines horizontales. Modèle à bielle directe, à bielle renversée, à fourreau	49
20.	Conventions sur le sens des mots haut et bas cylindre.	52

§ 3. — *Principaux organes des machines.*

21.	Organes fixes. — Parcours de la vapeur	53
22.	Organes mobiles.	56

PREMIÈRE PARTIE

Fonctionnement des chaudières.

CHAPITRE IV

Chauffage au charbon

§ 1. — *Généralités.*

23.	Rendement des chaudières. Tableau des chaleurs de vaporisation.	61
24.	Autres propriétés des chaudières	62

§ 2. — *Le charbon et les grilles.*

25.	Composition du charbon. Son analyse élémentaire.	62
26.	Classification de Gruner; analyse immédiate. Qualités exigées des charbons de la Marine.	64
27.	Expériences de recette des charbons de la Marine française. . . .	65
28.	Particularités des expériences faites dans divers pays.	68
29.	Description des grilles; modèles divers. Soles. Autels	69

§ 3. — *Du tirage naturel.*

30.	Calcul de la dépression qui produit le tirage et de la vitesse qui y correspondrait dans un circuit non résistant.	71
31.	Vitesse réelle de la colonne gazeuse. Résistance des diverses parties du circuit. Section des passages	73
32.	Hauteur des cheminées.	76

§ 4. — *Du tirage forcé.*

33.	Anciennes applications du tirage forcé.	77
34.	Appareil Bourdon-Thierry	77
35.	Propriétés générales du tirage forcé	78

Nos		Pages
36.	Soufflerie de vapeur dans la cheminée. Expériences de M. Joessel.	79
37.	Soufflerie de vapeur dans les cendriers. Appareil Niclausse . . .	80
38.	Soufflerie d'air dans la cheminée	82
39.	Ventilateurs centrifuges dans la cheminée.	84
40.	Tirage forcé en chambre close. Application aux torpilleurs . . .	85
41.	Tirage forcé en chambre close sur les grands navires	87
42.	Tirage forcé en cendrier clos	91

§ 5. — *Du tirage forcé appliqué à l'accroissement de l'utilisation de la chaleur.*

43.	Source d'économie de chaleur dans le tirage forcé.	93
44.	Réchauffage de l'eau d'alimentation	94
45.	Réchauffage de l'air de la combustion. Compétition entre MM. J. Howden et Ellis	97

§ 6 — *Conduite des feux.*

46.	Travail des chauffeurs. Outils de chauffe.	103
47.	Décrassage des grilles. Grilles secouables.	105
48.	Ramonage	106
49.	Entrainements d'eau. Préservatif cherché dans l'huile minérale. .	108
50.	Disparition accidentelle des niveaux. Effet de la bande	110
51.	Autres accidents et incidents divers	110
52.	Conditions de chauffe particulières aux essais. Mesure de la durée d'une expérience.	111
53	Tentatives de chargement mécanique du charbon	113

CHAPITRE V

Chauffage au pétrole.

54.	Différentes sortes de pétrole employées au chauffage.	115
55.	Chauffage par combustion du pétrole liquide. Augets et mèches. .	115
56.	Chauffage à la vapeur de pétrole, ...	117
57.	Pulvérisateurs; modèles divers.	119
58.	Disposition des foyers au pétrole. Écrans et revêtements en maçonnerie.	121
59.	Dépense de gaz pour la pulvérisation. Choix à faire entre la vapeur et l'air comprimé	123
60.	Rendement du pétrole en eau vaporisée	127
61.	Avantages divers de la chauffe au pétrole. Son avenir	128
62.	Chauffage mixte. Son utilité	129
63.	Rendement comparatif des deux combustibles dans le chauffage mixte	129
64.	Applications diverses du pétrole à la navigation.	132

CHAPITRE VI

Utilisation des chaudières et conditions dont elle dépend.

§ 1. — *Production de la chaleur.*

65.	Rendement calorifique total des chaudières. Sa décomposition en rendement de la combustion et en utilisation de la chaleur . . .	135
66.	Quantité d'air nécessaire à la combustion du charbon. Perte de chaleur due à un excès d'air	136
67.	Combustion du charbon; réactions chimiques; température de la flamme.	138
68.	De la fumée et de son analyse.	140

§ 2. — *Transmission de la chaleur à l'eau et à la vapeur.*

Nos		pages
69.	Transmission de la chaleur. Principes généraux sur la conductibilité	141
70.	Influence de l'état de propreté des parois	144
71.	Transmission de la chaleur par convection	145
72.	Surface de chauffe et surface de grilles. Rapport entre ces surfaces.	146
73.	Pertes par rayonnement. Feutrage	148
74.	Isolement des conduits de fumée	151

CHAPITRE VII

De l'usure et de la corrosion.

75.	Causes d'usure chimiques produisant la détérioration intérieure des chaudières	153
76.	Action des acides gras. Réactions chimiques dans les dépôts salins	154
77.	Principales précautions contre la corrosion	156

DEUXIÈME PARTIE

Description et construction des chaudières tubulaires.

CHAPITRE VIII

Chaudières cylindriques.

§ 1. — *Dispositions générales.*

78.	Chaudières type marin. Modèle à simple façade	161
79.	Modèle à double façade	165
80.	Chaudières à tubes directs	165

§ 2. — *Construction.*

81.	Description des foyers	170
82.	Foyers en viroles. Foyers en tôle ondulée. Armaturages	171
83.	Construction des boites à feu	177
84.	Tubes. Modèles divers. Distribution	181
85.	Emmanchement des tubes et protection de leurs joints	185
86.	Tubes-tirants	190
87.	Tamponnage des tubes	190
88.	Conduits de fumée. Danger du refroidissement brusque dans la boite à fumée	193
89.	Enveloppe extérieure des chaudières	194
90.	Résistance des enveloppes. Charge des matériaux. Inégalités de dilatation	199
91.	Fatigues permanentes et altération du métal	205

CHAPITRE IX

Chaudières locomotives

§ 3. — *Application dans la Marine des chaudières locomotives.*

92.	Motifs d'adoption des chaudières locomotives	209
93.	Description et construction	211

CHAPITRE X

§ 4. — *Renseignements généraux.*

Nos		Pages
94.	Durée des chaudières type marin	217
95.	Poids des chaudières tubulaires	218
96.	Encombrement	229

TROISIÈME PARTIE

Chaudières tubuleuses.

97.	Introduction des chaudières tubuleuses dans la marine	233

CHAPITRE XI

Chaudières à circulation limitée ou à serpentins.

98.	Caractère général des chaudières à circulation limitée	237
99.	Historique de la chaudière Belleville	237
100.	Description de la chaudière Belleville	243
101.	Détails de construction	248
102.	Propriétés générales. Durée des chaudières Belleville	249
103.	Poids et encombrement	250
104.	Avantage particulier à la circulation limitée	250

CHAPITRE XII

Chaudières à circulation libre.

105.	Premiers modèles à circulation libre. — Principe des appareils. — Travaux de M. Joessel	253
106.	Chaudière Penelle	255
107.	Chaudière Oriolle	255
108.	Chaudière D'Allest. Ses modèles successifs	258
109.	Dispositions générales. — Encombrement	261
110.	Détails de construction de la chaudière D'Allest	262
111.	Résultats obtenus	264
112.	Chaudière Seaton (premier modèle)	266
113.	Chaudière Babcock et Wilcox	267
114.	Chaudière Anderson et Lyall	269
115.	Chaudière Towne	270
116.	Chaudière Petit et Godard	271
117.	Chaudière Field	272
118.	Chaudière Collet. Chaudière Niclausse	273
119.	Chaudière Dürr	279
120.	Chaudière De Dion-Bouton-Trépardoux	280
121.	Chaudière Ward	281
122.	Chaudière Charles et Babillot	283
123.	Modèles divers	284

CHAPITRE XIII

Chaudières à circulation accélérée.

124.	Mouvement de l'eau dans un circuit de grande hauteur	287
125.	Effet de la dilatation de l'eau	287

Nos		Pages
126.	Effet de la production des bulles de vapeur	289
127.	Comparaison des effets de la vaporisation et de la dilatation.	293
128.	Histoire des chaudières à circulation accélérée.— Chaudière Sochet	294
129.	Chaudière Du Temple. Disposition primitive	296
130.	Perfectionnements successifs de la chaudière Du Temple. Chaudière Du Temple-Normand. Chaudière Guyot	298
131.	Chaudière Normand	303
132.	Application des chaudières Normand aux grands navires. — Chaudières Normand-Sigaudy	309
133.	Chaudière Leblond et Caville	310
134.	Nouvelle chaudière D'Allest	312
135.	Adoption rapide des chaudières genre Du Temple	313
136.	Chaudière Thornycroft	314
137.	Chaudière Mosher et chaudière Symon-House, imitées de Thornycroft	318
138.	Chaudière Yarrow	321
139.	Chaudière Blechynden	323
140.	Chaudière Reed	325
141.	Chaudière S. White	326
142.	Chaudière Fleming et Fergusson	327
143.	Chaudière Seaton, deuxième modèle	328
144.	Modèles divers	329

CHAPITRE XIV

Avantages et inconvénients des chaudières tubuleuses. Comparaison des différents modèles entre eux.

§ 1. — *Avantages généraux des chaudières tubuleuses.*

145.	Avantages généraux et avantages particuliers à la marine	331
146.	Aptitude à résister aux hautes pressions	331
147.	Immunité relative contre les accidents	332

§ 2. — *Avantages particuliers au point de vue de la marine.*

148.	Légèreté des chaudières tubuleuses. Discussion des chiffres qui la représentent	332
149.	Aptitude à supporter le tirage forcé	334
150.	Rapidité de mise en pression	336

§ 3. — *Considérations diverses.*

151.	Encombrement horizontal	336
152.	Prix des chaudières tubuleuses. Leur durée	337
153.	Facilité des réparations. Difficulté du tamponnage des tubes	339
154.	Résistance aux brusques changements de température	341

§ 4. — *Inconvénients des chaudières tubuleuses.*

155.	Danger des irrégularités d'alimentation	342
156.	Nécessité d'une eau d'alimentation très pure	342

§ 5. — *Comparaison des chaudières tubuleuses entre elles.*

157.	Comparaison entre les trois modèles Belleville, D'Allest, Niclausse.	343
158.	Comparaison des chaudières Du Temple-Normand, avec les précédentes	346
159.	Combinaison de chaudières tubuleuses et de chaudières cylindriques	346

CHAPITRE XV

Poids et encombrement des chaudières tubuleuses.

Nos		pages
160.	Tableaux de poids	349
161.	Encombrement	357

QUATRIÈME PARTIE

Accessoires de chaudières.

162.	Classification des accessoires de chaudières	361

CHAPITRE XVI

Accessoires formant complément de l'enveloppe.

163.	Portes de visites. Bouchons autoclaves	363
164.	Portes de foyers et de cendriers	364
165.	Cheminées. Enveloppes. Capots de cheminée	365

CHAPITRE XVII

Accessoires relatifs à la pression et au mouvement de la vapeur.

166.	Manomètres. Soupapes avertisseuses	369
167.	Soupapes de sûreté. Calcul de leur section	370
168.	Soupapes de sûreté à grande levée	374
169.	Soupapes d'arrêt. Robinets-vannes	375
170.	Détendeurs de vapeur ou soupapes régulatrices	377
171.	Tuyautage de vapeur. Joints glissants. Purges	379
172.	Séparateurs et épurateurs. Sécheurs et surchauffeurs	380

CHAPITRE XVIII

Accessoires relatifs à l'alimentation et à tout ce qui concerne l'eau des chaudières.

173.	Tubes de niveau. Robinets-jauges	387
174.	Arrivée de l'eau d'alimentation. Régulateurs à main	390
175.	Régulateurs automatiques d'alimentation	391
176.	Saturation et saturomètres. Anciennes extractions continues	394
177.	Appareils d'extraction actuels. Appareils de vidange	395
178.	Appareils de brassage d'eau	396
179.	Appareils de purification des eaux	398
180.	Plaques de zinc. Electrogènes	400
181.	Extraction de l'huile minérale. Filtres à éponges	400
182.	Purificateurs de vapeur	402
183.	Réchauffeurs à vapeur de l'eau d'alimentation. Calcul de leur utilité théorique	402
184.	Appareils de réparation d'eau douce. Bouilleurs à simple effet	406
185.	Bouilleurs à effet multiple	408
186.	Bouilleurs à combinaison, produisant à la fois de l'eau douce et du travail	412

CHAPITRE XIX

Accessoires relatifs au service des escarbilles.

Nos		Pages
187.	Mouvement du charbon et des escarbilles	415
188.	Escarbilleur De Maupeou	415
189.	Ejecteur d'escarbilles à eau	416

APPENDICE AU CHAPITRE VI

Rendement économique des chaudières de locomotives.

190.	Expériences de M. Henry sur l'influence de la longueur des tubes.	418
191.	Influence de la disposition du foyer	420

Errata	422
Liste des figures	423

Paris. — Imp. E. BERNARD et Cie, 23, rue des Grands-Augustins

Librairie Scientifique et Industrielle des Arts et Manufactures

E. BERNARD & Cie

53 ter, Quai des Grands-Augustins — PARIS

PETITE ENCYCLOPÉDIE

ÉLECTRO-MÉCANIQUE

PUBLIÉE SOUS LA DIRECTION

DE

M. Henry de GRAFFIGNY

INGÉNIEUR CIVIL

Cette collection, composée de **12 volumes** illustrés de plus de **500 figures explicatives**, constitue le plus précieux *vade-mecum*, la bibliothèque la plus complète et la plus nécessaire à tous les ingénieurs, directeurs de stations centrales pour l'éclairage ou le transport de l'électricité, ouvriers monteurs et poseurs de sonnettes et téléphones, galvanoplastes, nickeleurs, chauffeurs et conducteurs de machines à vapeur, à gaz ou à pétrole, amateurs, enfin à toutes les personnes qui s'intéressent, théoriquement ou pratiquement, aux applications de l'électricité et de la mécanique. Ces douze ouvrages embrassent tout ce qui a trait à ces sciences.

N^os^ 1.— Manuel élémentaire d'Électricité industrielle.
2.— Manuel du Conducteur de dynamos et moteurs électriques
3.— Les Piles et les Accumulateurs.
4.— Les Canalisations électriques.
5.— Chauffeur-Conducteur de Machines à vapeur.
6.— Conducteur de Moteurs à gaz et à pétrole.
7.— Guide pratique d'Eclairage électrique.
8.— Le Monteur-Appareilleur électricien.
9.— Transport électrique des forces motrices.
10.— Les Réseaux téléphoniques et sonnettes.
11.— Guide pratique de l'Electrochimiste.
12.— L'Electricite pour tous. — Applications diverses.

Chaque volume comprend 160 pages avec de nombreuses figures dans le texte.

Prix de chaque volume. . . . . **1** fr. **50**
La collection des 12 volumes. . . . . **15** fr. »

VIENT DE PARAITRE :

PETIT DICTIONNAIRE PRATIQUE

DE MÉCANIQUE ET D'ÉLECTRICITÉ

par **Charles BARBAT**, Mécanicien diplômé
Lauréat d'honneur et Membre de plusieurs Sociétés savantes

Un volume in-18 de plus de 1200 pages et près de 1500 figures

Prix cartonné : **8** francs. — Franco : **8** fr. **85**

Ouvrages sur la Marine en ve

PARIS. — 53 ter, Quai des

Bienaymé (A.-F.-A.), Directeur de l'Ecole d'application du Génie maritime. — **Les Machines marines,** Cours professé à l'Ecole du Génie maritime.

Ouvrage couronné par l'Académie des sciences

1 volume grand in-4 de 500 pages et un atlas de 162 planches doubles.— Ouvrage épuisé. Prix : **100** fr.

Widmann (E.), Ingénieur de la Marine. — **Etude des principes de la Construction des Machines marines.**

Ouvrage couronné par l'Académie des sciences.

Étude du diagramme.— Courbes de détente. — Dépense de vapeur.— Perte de pression.— Principe économique des machines à détente. — Comparaison entre le rendement économique des machines de différents types. — Enveloppe de vapeur. — Effets des forces d'inertie sur les mouvements des tiroirs. — Condenseurs, pompes, formules pratiques pour la construction des machines marines, etc.

1 volume in-4. Prix : **20** fr.

Clausel (G.). — Étude sur le Rivetage.

1 volume grand in-4 avec de nombreuses figures intercalées dans le texte et 12 tableaux. Prix : **15** fr.; relié : **20** fr.

Polonceau (E.) et **Plaud (L.). — Les Machines et Chaudières marines** à l'Exposition universelle de 1889.

1 volume gr. in-8 de 100 pages et un atlas de 74 planches. Prix : **50** fr.

Hauser (A.), Ingénieur, Sous-Directeur de l'Ecole du Génie maritime. — **Cours de Construction navale,** professé à l'Ecole du Génie maritime.

1 vol. gr. in-4 de 590 pages et un atlas de 340 pl. — L'ouvrage complet : **100** fr.

Dixon Kemp (édition française, traduite, annotée et augmentée par **MM. Boyn** et **Martinenq**). — **Yacht Architecture** et **Yacht et Boat Sailing.**

PREMIÈRE PARTIE. — *Architecture et Construction.* — Le premier volume comprenant 447 pages de texte avec 203 figures intercalées et un atlas de 67 planches est vendu au prix de 35 francs.

DEUXIÈME PARTIE. — *Navigation à voile et à vapeur.* — Le deuxième volume comprenant 412 pages de texte avec 93 figures intercalées et un atlas de 133 planches est vendu au prix de 40 francs.

L'ensemble de l'ouvrage comprend 4 volumes grand in-8 élégamment cartonnés dont 2 volumes de texte et 2 volumes de planches. — L'ouvrage complet : Prix . . . . . **60** fr.

Plaud (L.), Ingénieur en chef du « Bureau Veritas ». — **La Marine marchande** à l'Exposition Universelle de 1889.

Avant-propos. — Considérations générales. — Navires à roues. — Navires à hélice. — Services spéciaux. — Les navires pétroliers. — Dragues marines. — Haleurs et toueurs. — Bateaux-pompes. — Bac de passage. — Bateau de pêche. — Navires à voiles.

1 volume in-8 jésus de 107 pages, 25 figures et un atlas de 67 pl. Prix : **40** fr.

Demoulin (M.). — Nouvelles Machines marines des bâtiments à grande vitesse, des torpilleurs et des embarcations à vapeur.

1 volume in-4 de 240 pages et un atlas de 55 planches de même format que le *Cours de Machines marines* de M. Bienaymé dont il est le complément indispensable. Prix : **40** fr.

Cours pratique de Navigation estimée et observée.

Déviation des compas. — Variation — Relèvement du point.— Calcul du point.— Méthode de compensation. — Observation des hauteurs méridiennes. — Navigation astronomique — Horizon. — Dépression. — Réfraction. — Latitude, longitude. — Tables.

1 volume in-18 de 252 pages et 45 figures. Prix : **3** fr. **50**

a *Librairie E. BERNARD & Cie*

ugustins, 53 ter. — PARIS

Roché (Georges), Docteur ès sciences. — **Explorations sous-marines.**
Des procédés d'études employés pour les missions d'explorations sous-océaniques et de technique des pêcheries sous-marines représentées à l'Exposition universelle de 1889.

1 volume grand in-8 de 121 pages et 13 figures. Prix : **7 fr. 50**

Witz (A.). — Traité théorique et pratique des **Moteurs à Gaz et à Pétrole.**

2 volumes grand in-8 ensemble 900 pages, 300 figures et 6 planches. Prix : **30 fr.**

OUVRAGES DE M. B. MARTINENQ

Guide des Calculs de déplacement et de stabilité hydrostatique des navires.

Table des matières. — Introduction. — Chapitre Ier : Des formes et du déplacement. — Chap. II : Du centre de carène. — Chap. III : Des surfaces et centre des gravités des flottaisons, sections immergées au maître couple. — Chap. IV : Du métacentre. — Chap. V : Des courbes de stabilité. — Chap. VI : Du poids et du centre de gravité de tout le système. — Chapitre VII : Des pantocarènes et des courbes en général de stabilité statique. — Chap. VIII : De l'assiette et de la stabilité du navire. — Chap. IX : De la stabilité de voiture. Expérience de stabilité.

1 volume in-4 de 202 pages, 43 figures et 6 planches. Prix : **20 fr.**

Aide-Mémoire du Constructeur de navire, de machines et de chaudières marines, du mécanicien, du navigateur, de l'armateur.

Instructions et renseignements théoriques et pratiques à l'usage de la marine de guerre, de plaisance et du commerce. — Mathématiques. — Coque et armement des navires — Machines et chaudières marines, — Conduite et entretien des machines et chaudières marines. — Electricité hydraulique à bord des navires. — Navigation. — Renseignements nautiques divers.

1 volume de près de 900 pages et plus de 700 figures. Prix : **12 fr.**

Guide pratique du Jaugeage des navires de commerce et de plaisance.

1re Partie : Lois, décrets, ordonnance et circulaires de la Direction générale des Douanes sur le jaugeage des navires.

2e Partie : Application du jaugeage légal à des navires pris comme exemple. Règle 1 : pour les navires vides ; Règle 2 : pour les navires chargés.

3e Partie : Lois, décrets, instructions et circulaires ministérielles concernant la marine marchande.

I, Détail des planches : Plan d'ensemble d'un paquebot à hélice de 1800 chevaux ; II, Coupe transversale ; III, Epure de la jauge ; IV, Plan d'ensemble d'un navire à water-ballast ; V, Plan d'un canot en bois non ponté ; VI, Plan d'ensemble d'un yacht de plaisance ; VII, Plan de voilure du Yacht *Massilia*.

1 volume grand in-4 de 244 pages, 44 figures et 7 planches. Prix : **20 fr.**

Traité général des Propulseurs employés dans la navigation à vapeur.

Travail des propulseurs, utilisation, recul. — Roues à aubes. — Système de roues. — Dimensions des navires. — Hélices. — Propriétés générales. — Eléments de l'hélice. — Construction des hélices. — Dimensions. — Applications. — Renseignements sur les diverses hélices en service.

1 volume in-4 de 200 pages, 65 figures et un atlas de 25 planches in-plano avec teintes conventionnelles. Prix : **20 fr.**

Construction, conduite et entretien des machines et chaudières marines. — Electricité et hydraulique à bord des navires.

(Extrait de l'*Aide-mémoire du Constructeur de Navires*).

1 volume in-18 de 376 pages et 208 figures Prix, cartonné : **5 fr.**

Librairie E. BERNARD et C^ie^, 53 ter, Quai des G^ds^ Augustins, **PARIS**

COURS
de MÉCANIQUE APPLIQUÉE aux MACHINES

par **Boulvin**

ingénieur honoraire des Ponts et Chaussées, Ancien élève de l'Ecole d'application du Génie maritime.

(1^er^ volume). — **Theorie générale des Mécanismes.**

Equation générale des mécanismes.— Etude des résistances passives.— Frottement des liquides et des solides. — Equilibre des mécanismes soumis à des résistances passives. — Régulateurs du mouvement. — Mesure expérimentale du travail des forces et de la puissance des machines.

Un volume in-8° de 230 pages et 164 figures. Prix **7 fr. 50**

(2^e^ volume). — **Moteurs animés, récepteurs hydrauliques, récepteurs pneumatiques.**

Machines servant à recueillir l'action des moteurs animés. — Machines dans lesquelles l'eau agit par son poids. — Machines dans lesquelles l'eau agit par sa vitesse. — Machines dans lesquelles l'eau agit par pression. — Récepteurs hydrauliques et pneumatiques. — Roues diverses. — Turbines. — Roues hydrauliques. Modes d'établissement et réglage des turbines. — Moteurs à action directe. — Machines à rotation. — Etude hydrodynamique des machines à colonnes d'eau — Roues américaines. — Divers genres de moulins. —Régulateurs de vitesse

Un volume in-8° de 204 pages et 140 figures. Prix **7 fr. 50**

(3^e^ volume). — **Théorie des Machines thermiques.**

Thermodynamique générale. — Etude des gaz permanents. — Principe de Carnot — Vapeurs saturées et surchauffées. — Ecoulement des fluides, des gaz permanent et des vapeurs — Appareils à jet. — Machines à air chaud, à cycles fermés et ouvert, à gaz ou à mélanges détonnants — Combustion et explosion. — Etude organique des moteurs à gaz. — Modes d'allumage et de réglage. — Moteurs alimentés aux gaz pauvres et moteurs à pétrole. — Machines à vapeurs. — Condensation. — Action des parois. — Machines pour production industrielle du froid. — Machines à air. — Machine à vapeur liquéfiable.

Un volume in-8° de 343 pages et 130 figures. Prix **7 fr. 50**

(4^e^ volume). — **Générateurs de vapeur.**

Production de la chaleur. — Combustibles. — Combustion.— Tirage.— Foyer. — Utilisation de la chaleur.— Réchauffeurs. — Rendement. — Essais et résultats. — Chaudières simples et à bouilleurs. — Chaudières tubulaires. — Chaudières multitubulaires. — Alimentation. — Prise de vapeur et canalisation. — Conduite. — Appareils de sûreté. — Cause de destruction. — Explosions. — Mesures de sécurité.

Un volume in-8 d'environ 250 pages et 108 figures. Prix **7 fr. 50**

(5^e^ volume). — **Machines à vapeur.**

Dispositions d'ensemble. — Machines à piston, rotatives, à réaction, semi-fixes et locomobiles. — Moteurs spéciaux à grande vitesse. — Moteur pour la petite industrie. — Théorie dynamique des moteurs à vapeur. — Machines monocylindriques. — Machines Woolf, Compound, à triple et quadruple expansion. — Rendement organique, limite de la détente. — Cylindres et enveloppes. — Distributions diverses. — Obturateurs. — Tiroirs. — Soupapes. — Régulateurs. — Servo-Moteurs. — Condenseur et pompe à air. — Condensation.

Un volume in-8° de 300 pages avec 3 pl. et 280 fig. Prix **10 fr.**

(7^e^ volume). — **Machines servant à déplacer les fluides.**

Machines destinées à l'élévation de l'eau. — Des pompes. — Installation générale de la pompe et du moteur. — Machines diverses. — Pistons et soupapes. — Remplissage des réservoirs d'air. — Châteaux d'eau. — Distributions forcées. — Appareils fonctionnant par communication de force vive. — Machines servant à déplacer l'air. — Appareils agissant par communication de force vive.

Un volume in-8° de 142 pages et 9 planches. Prix **7 fr. 50**

En préparation :

6^e^ volume. — Machines servant aux transports (locomotives et bateaux à vapeur).

8^e^ volume. — Transport du travail à longue distance, applications de l'air comprimé et de l'eau sous pression, appareils de levage, ascenseurs.

Prix de souscription à l'Ouvrage complet 50 fr.

LIBRAIRIE SCIENTIFIQUE ET INDUSTRIELLE DES ARTS ET MANUFACTURES

E. BERNARD & C^ie^

53 ter, Quai des Grands-Augustins — PARIS

LA MARINE

DES

ÉTATS-UNIS

PAR

L. BERTIN

INGÉNIEUR DES CONSTRUCTIONS NAVALES
ANCIEN DIRECTEUR DE L'ÉCOLE DU GÉNIE MARITIME
DIRECTEUR DU MATÉRIEL

Un vol. in-8 de 136 pages avec un atlas de 30 grandes planches. — Prix : **30** fr.
Relié avec planches montées sur onglets. — Prix : **35** fr.

Du même Auteur :

AMPLITUDE DU ROULIS

SUR HOULE

NON SYNCHRONE

Une brochure grand in-8 de 54 pages et 7 planches. . . . Prix : **3 fr. 50**

Chaudieres marines :
Cabot Science 004040176
3 2044 091 907 535